

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius RUDINSKAS

**BEPILOČIŲ ORLAIVIŲ SKRYDŽIO
PARAMETRŲ MATAVIMŲ DUOMENŲ
PERDAVIMO SAUGOS METODIKOS
SUKŪRIMAS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

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

VG TU leidyklos TECHNIKA 1975-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-067-4

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2011

© Darius, Rudinskas, 2011

darius.rudinskas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Darius RUDINSKAS

DESIGN OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHT PARAMETER DATA TRANSMISSION SAFETY METHOD

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

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

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos bepiločių orlaivių matavimų informacijos perdavimo saugos užtikrinimo priemonės taikant esamus matavimų informacijos apdorojimo metodus ir priemones. Pagrindiniai tyrimų objektai yra bepiločio orlaivio integruota diagnostikos sistema bei matavimų informacijos apdorojimo metodai. Šie objektai yra svarbūs aviacijos technikos nepertraukiamo veikimo užtikrinimui. Pagrindinis disertacijos tikslas yra ištirti bepiločio orlaivio integruotą diagnostikos sistemą matavimų informacijos saugos užtikrinimo atžvilgiu ir pateikti matavimų informacijos saugos metodiką ir galimas priemones.

Darbe sprendžiami keli bepiločio orlaivio integruotos diagnostikos sistemos uždaviniai. Uždaviniai suformuluoti, atsižvelgiant į šiuolaikiniuose bepiločiuose orlaiviuose vis dažniau diegiamų elektroninių valdymo sistemų integruotos techninės diagnostikos aktualumą ir siejami su matavimų informacijos saugos užtikrinimo problema.

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

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

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta matavimų duomenų apdorojimo orlaivių integruotos diagnostikos sistemose analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikti orlaivio integruotos diagnostikos sistemų matavimų duomenų apdorojimo metodai ir priemonės.

Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose pateikiama matavimų informacijos saugos metodika, jos modeliavimas, įdiegimo bepiločiame orlaivyje galimybės bei eksperimentinis tyrimas. Parodytos matavimų duomenų saugos metodikos galimybės.

Disertacijos tema yra atspausdinti šeši moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą, du – recenzuojamuose žurnaluose, trys – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The dissertation analyses measures to ensure unmanned aerial vehicle (UAV) measurement data transfer safety applying available measurement information processing methods and equipment. The main research objects are integrated UAV diagnostics system and measurement information processing methods. These objects are important for ensuring seamless operation of aviation technologies. The main aim of the dissertation is to analyze the integrated diagnostics system of an UAV with the focus on establishing measurement information safety and to provide a method for measurement information safety and possible equipment.

The main goals of the research concern the application of tasks performed by the UAV integrated diagnostic system. The goals are formulated taking into consideration the topicality of an integrated diagnostics system, which is increasingly being used in electronic control systems installed in modern UAV and addresses the problem of ensuring measurement information safety.

The dissertation consists of the introduction, four chapters, generalization of results, list of references and publications of the author on the topic of the dissertation and two annexes.

In the introduction the research problem and research topicality are discussed, the research object is described, research aims and goals are formulated, and the research methods, scientific innovation and practical application of research results are discussed. In the last part of the introduction publications and conference presentations on the topic of the thesis by the author and the structure of the dissertation are presented.

The first chapter revises literature on the topic. Analysis of measurement data processing in integrated diagnostics systems is presented. In the last sections of the chapter the conclusions are formulated and the goals of the dissertation are reconsidered.

The second chapter presents the methods and equipment for measurement data processing of integrated UAV diagnostics systems.

The third and fourth chapters provide the method for measurement information security, its modeling, possibilities of integrating it into an UAV and description of the experimental research. The potential of the method suggested for measurement data safety is discussed.

On the topic of the dissertation six scientific research articles have been published: one in a scientific journal, included in the Thomson ISI list, two in reviewed journals, and three in the proceedings of national and international conferences. Research results of the thesis have been presented in seven scientific conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

- $\mathbf{x}$ – proceso būsenos vektorius;
 $\mathbf{F}$ – sistemos matrica;
 $\mathbf{w}$ – atsitiktinis proceso triukšmo vektorius;
 $\mathbf{z}$ – būsenos stebėjimų vektorius;
 $\mathbf{H}$ – matavimų matrica;
 $\mathbf{v}$ – atsitiktinis matavimų triukšmo vektorius;
 $\mathbf{Q}$ – proceso kovariacijų matrica;
 $\mathbf{R}$ – triukšmo kovariacijų matrica;
 t_k – diskretaus laiko momentas;
 Φ_k – būsenos perdavimo matrica;
 $\mathbf{z}_k$ – matavimų vektorius laiko momentu t_k ;
 $\mathbf{H}_k$ – matavimų matrica laiko momentu t_k ;
 $\mathbf{P}^-$ – prognozuojama klaidos kovariacijų matrica;
 $\mathbf{x}^+$ – įvertinta būsena;
 $\mathbf{K}_k$ – Kalmano stiprinimo matrica;

$\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}$ – sigma taškas;
 $\mathbf{x}_k^-$ – prognozuojamas būsenos vektorius;
 $\mathbf{P}_z$ – prognozuojama matavimų klaidos kovariacijų matrica;
 $\mathbf{P}_{xz}$ – prognozuojama klaidos kryžminė kovariacijų matrica;
 f_{ak} – pavaros klaidos;
 f_{sk} – jutiklio klaidos;
 f_{rk} – ryšio kanale atsiradusios sklaidos;
 $\mathbf{R}_k$ – signalo liekanos vektorius;
 $\mathbf{x}_p^+$ – pagrindinio filtro įvertinta būsena;
 $\mathbf{P}_p^{-1}$ – informacijos matrica;
 S_i – jautrumo veiksnys.

Santrumpos

Santrumpa	Lietuviškai	Angliškai
IVHM	Integruotas transporto priemonės techninės būklės valdymas	Integrated Vehicle Health Management
MIS	Matavimų informacinė sistema	Measurement Information System
OIDS	Orlaivio integruota diagnostikos sistema	Aircraft Integrated Diagnostic System
OIS	Orlaivio informacinė sistema	Aircraft Information System
CBM	Būklės stebėjimas	Condition Based Monitoring
KF	Kalmano filtras	Kalman Filter
DKF	Diskretus Kalmano filtras	Discrete Kalman Filter
EKF	Išplėstasis Kalmano filtras	Extended Kalman Filter
UKF	Unscented Kalmano filtras	Unscented Kalman Filter
UT	Unscented transformacija	Unscented Transformation
FDI	Klaidų nustatymas ir identifikavimas	Fault Detection and Identification
UAV	Nepilotuojamas orlaivis	Unmanned Aerial Vehicle
FDIR	Klaidų nustatymas, izoliavimas ir atstatymas	Fault Detection and Isolation & Recovery
BITE	Integruota testavimo įranga	Built-In Test Equipment

ISHM	Integruotas sistemos techninės būklės valdymas	Integrated Systems Health Management
SHM	Posistemės techninės būklės valdymas	Subsystems Health Management
FDI	Klaidų nustatymas ir identifikavimas	Fault Detection and Identification
FTCS	Klaidoms tolerantiška valdymo sistema	Fault Tolerant Control System
FDD	Klaidų nustatymas ir diagnozė	Fault Detections and Diagnosis
PFTCS	Pasyvi klaidoms tolerantiška valdymo sistema	Passive Fault Tolerant Control System
AFTCS	Aktyvi klaidoms tolerantiška valdymo sistema	Active Fault Tolerant Control System
GPS	Globali padėties nustatymo sistema	Global Positioning System
MMAE	Daugeliui modelių pritaikytas vertinimas	Multiple Model Adopt Estimation
SPI	Nuosekli sąsaja	Serial Peripheral Interface
PWM	Impulso pločio moduliacija	Pulse Width Modulation
ISM	Pramonė, mokslas ir medicina	Industrial, Scientific and Medical
BJ	Bevielis jutiklis	Wireless Sensor
BJTK	Bevielių jutiklių tinklo koordinatorius	Wireless Sensor Network Coordinator
DSAI	Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginio	Data Collection and Processing Device
JKF	Jungtinis Kalmano filtras	Federated Kalman Filter

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. MATAVIMŲ DUOMENŲ APDOROJIMO METODŲ ORLAIVIO INTEGRUOTOS DIAGNOSTIKOS SISTEMOSE APŽVALGA	7
1.1. Orlaivio ryšių sistemų apžvalga	7
1.2. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų koncepcija ir veikimo principas	10
1.3. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų tarpusavio sąsajų apžvalga	11
1.4. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų matavimų duomenų apdorojimo ir klaidų nustatymo metodų apžvalga.....	15
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	19

2. ORLAIVIO INTEGRUOTOS DIAGNOSTIKOS SISTEMŲ MATAVIMŲ DUOMENŲ APDOROJIMO METODAI IR PRIEMONĖS.....	21
2.1. Kalmano filtravimo metodas	22
2.2. „Unscented“ Kalmano filtravimo algoritmas	25
2.3. Klaidų tipai bei jų modeliavimas.....	27
2.2. Liekanos generavimo metodai.....	33
2.3 Kalmano filtravimo metodo taikymas FDI sistemose	35
2.4. Antrojo skyriaus išvados	40
3. MATAVIMŲ INFORMACIJOS SAUGOS METODIKOS SUDARYMAS IR MODELIAVIMAS	41
3.1. Nepilotuojamo orlaivio matavimų informacinės sistemos tyrimas	42
3.2. Matavimų informacijos saugos metodikos sudarymas ir modeliavimas	46
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	54
4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS IR REZULTATŲ ANALIZĖ	55
4.1. Bevielių jutiklių tinklo projektavimas	56
4.1.1. Fly-by-Wireless koncepcija.....	56
4.1.2. Ryšių technologijos parinkimas	57
4.1.2. Matavimų informacinės sistemos bandymai	57
4.2. Eksperimentų planavimas, matavimų sistemos eksperimentinis tyrimas ir duomenų analizė	60
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados	65
BENDROSIOS IŠVADOS	67
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	69
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	75
PRIEDAI	77
A priedas. Klaidų modeliavimo programos kodas	77
B priedas. Nepilotuojamo orlaivio valdymo sistemos struktūrinė schema.....	84

Contents

INTRODUCTION.....	1
Topicality of the problem.....	1
Relevance of the work.....	2
Research object	2
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methods of the work	3
Scientific novelty	3
Practical value	4
Defended propositions.....	4
Aprobation of research results.....	4
Structure of the dissertation.....	5
 1. REVIEW OF MEASUREMENT DATA PROCESSING METHODS IN INTEGRATED DIAGNOSTIC SYSTEMS OF AIRCRAFT	 7
1.1. Review of aircraft communication systems.....	7
1.2. Aircraft integrated diagnostic sistem concept and operation principles	10
1.3. Aircraft integrated diagnostic sistem interface review	11
1.4. Aircraft integrated diagnostic sistem review of measurement data processing and error detection methods	15
1.6. First chapter conclusions and formulation of dissertation goals.....	19

2. AIRCRAFT INTEGRATED DIAGNOSTIC SYSTEMS METHODS AND MEANS FOR MEASUREMENT DATA PROCESSING.....	21
2.1. Kalman filter method.....	22
2.2. Unscented Kalman filter algorithym	25
2.3. Types of errors and their modelling	27
2.2. Residual generation methods.....	33
2.3 Application of the Kalman filter method in FDI sysytems.....	35
2.4. Second hapter conclusions	40
3. DESIGN AND MODELING OF SAFETY METHODS FOR MEASUREMENT INFORMATION.....	41
3.1. Design of security methods for measurement information.....	42
3.2. Modeling of security methods for measurement information	46
3.3. Thrird chapter conclusions.....	54
4. EXPERIMENTAL RESEARCH AND DATA ANALYSIS	55
4.1. Design of wireless sensor network	56
4.1.1. Fly-by-Wireless concept.....	56
4.1.2. Selection of communication technologies	57
4.1.2. Testing of measurement information system.....	57
4.2. Experiment planning and experimental research of the measurement system and data analysis.....	60
4.3. Fourth chapter conclusions.....	65
GENERAL CONCLUSIONS	67
REFERENCES AND SOURCES	69
ANNEXES	77
Annex A. Error modelling program code	77
Annex B. Unmanned aircraft AGAI 02.....	84

Įvadas

Problemos formulavimas

Orlaivių, sunkesnių už orą motorinių ir bemotorių, pilotuojamų ir nepilotuojamų skraidymo aparatų, techninei būklei keliami ypatingi reikalavimai. Orlaivio geros techninės būklės palaikymui taikomi įvairūs orlaivio techninės būklės palaikymo metodai: vizuali orlaivio apžiūra, įvairių orlaivio mazgų patikra neardomos kontrolės metodais ir nepertraukiamos stebėsenos metodai. Vizuali orlaivio apžiūra ir neardomos kontrolės metodų taikymas galimas tik orlaiviui esant ant žemės.

Šiuolaikiniuose orlaiviuose diegiamos sudėtingos elektroninės valdymo sistemos, kurios stipriai pakeitė piloto darbą: autopilotai, „Fly-by-Wire“, „Fly-by-Optic“, „Fly-by-Wireless“ sistemos. Visų orlaivio sistemų priežiūrai diegiamos integruotos autonominės diagnostikos sistemos, žinomos kaip integruotos transporto priemonės techninės būklės palaikymo (IVHM) sistemos, atliekančios ne tik orlaivio įrenginių, sistemų ar struktūrų stebėseną, bet ir sprendžia jų nepertraukiamo veikimo prognozavimo uždavinius.

Orlaivyje nuolatos atliekami įvairių parametrų (temperatūra, slėgis, vibracija, srautas, greitis, ir kt.) matavimai ir jų apdorojimas. Tokį orlaivį galime laikyti matavimų informacine sistema (MIS). Informacinėse sistemose nuolat susiduriama su informacijos saugumo (patikimumas, vientisumas ir integralumas) už-

tikrinimo uždavinių sprendimu. Šių uždavinių sprendimui didžiosios orlaivius ir aviacinę įrangą gaminančios kompanijos (Airbus, Boeing, Arinc, Honeywell) atlieka mokslinius tiriamuosius darbus.

Matavimų duomenų saugumui užtikrinti yra taikomi informacijos saugos metodai ir priemonės. Dažniausiai tai yra į ryšio liniją įterptos tam skirtos aparatinės ar programinės priemonės. Šių informacijos saugos priemonių realizavimui reikalingi papildomi aparatiniai ir programiniai sprendimai, kuriuos dėl didelio matavimų duomenų šaltinių skaičiaus dažnai būna sunku įgyvendinti. Taip pat, kaip rodo atlikta informacijos šaltinių apžvalga, geras informacijos saugos sistemos yra brangu įdiegti.

Disertacijoje nepilotuojamas orlaivis analizuojamas kaip informacinė matavimų sistema, kurioje realiu laiku atliekami orlaivio sistemų ir skrydžio parametrų matavimai. Matavimai atliekami sąlygomis, kur veikia natūralus triukšmas ir išoriniai trikdžiai. Trikdžiai yra natūralūs arba sąlygoti žmogaus. Dėl trikdžių galimi matavimų informacijos iškraipymai ar praradimas. Įprastai matavimų informacijos apdorojimui taikomi matavimų informacijos apdorojimo metodai atliekantys triukšmų šalinimo funkcijas.

Darbo aktualumas

Plečiantis aviacijos paslaugų sektoriui, daugėja atliekamų skrydžių skaičius. Kuriami vis sudėtingesni orlaiviai su automatinio valdymo sistemomis, gebančiomis atlikti visus skrydžio etapus (kilimas, skridimas, tūpimas). Greta įprastų orlaivių, kur skrydžiui atlikti reikalingas pilotas, bendrojoje oro erdvėje atsirado bepiločiai (orlaivio valdymas atliekamas iš žemės nuotoliniu būdu) ir autonominiai (skrydis atliekamas autonomiškai pagal iš anksto užduotą programą) orlaiviai.

Pastarųjų metų statistika rodo kompiuteriniams tinklams padidėjusias grėsmes, ypač kompiuterinių tinklų užvaldymo srityje. Reaguojant į šių grėsmių padidėjimą, aviacijoje skiriamas didelis dėmesys orlaiviuose integruojamų sistemų informacijos saugai.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas yra orlaivių integruotų diagnostikos sistemų duomenų šaltai ir matavimų informacijos apdorojimo metodai.

Darbo tikslas

Sukurti bepiločių orlaivių skrydžio parametrų matavimų duomenų perdavimo saugos metodiką.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti bepiločių orlaivių skrydžio parametrų matavimų sistemos ir integruotos diagnostikos sistemų sąsajos apžvalgą
2. Atlikti bepiločių orlaivių integruotų techninės diagnostikos sistemų veikimo principo, matavimų rezultatų apdorojimo metodų, taikomų techninių sprendimų analizę.
3. Sukurti matavimų informacijos saugaus perdavimo metodiką bepiločio orlaivio integruotoje diagnostikos sistemoje.
4. Atlikti sukurtos matavimų informacijos saugos metodikos taikymo eksperimentinius tyrimus bepiločio orlaivio informacinėje sistemoje.

Tyrimų metodika

Darbe naudojami teoriniai ir eksperimentiniai tyrimų metodai.

Teorinių tyrimų dalyje taikomi rekurentiniu Kalmano filtravimo algoritmu grindžiami analitiniai klaidų nustatymo ir identifikavimo metodai.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant suprojektuotą matavimų informacinę sistemą panaudojant bevielių jutiklių tinklą ir sukurtą programinę įrangą. Tyrimai atlikti sklandytuvu „LAK-20“ realaus skrydžio metu ir radijo bangomis valdomu orlaiviu „AGAI 02“ aprūpintu nepilotuojamą skrydį užtikrinančia įranga.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie matavimų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas matavimo duomenų saugos principas grindžiamas klaidų bepiločio orlaivio informacinėje sistemoje aptikimo technologija.

2. Pasiūlyta bepiločio orlaivio informacinės sistemos matavimų duomenų saugos metodika grindžiama skirtingų rūšių matavimų rezultatų suliejimu.
3. Sukurta metodika nereikalauja papildomos įrangos bepiločio orlaivio informacinėje sistemoje, tuo prisidėdama prie sistemos patikimumo ir skrydžių saugos.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas orlaivio sistemų klaidų nustatymo bei identifikavimo ir matavimų informacijos saugos metodas tinkamas diegti naujai kuriamose ir jau esamose integruotose diagnostikos sistemose, užtikrinant matavimų informacijos vientisumą.

Ginamieji teiginiai

1. Klaidų nustatymu ir identifikavimu pagrįsto metodo taikymas matavimų informacinės sistemos duomenų saugai.
2. Matavimų informacijos, esant atsitiktiniams ir neatsitiktiniams trikdžiams, išsaugojimas taikant skirtingų rūšių matavimų duomenis.
3. Bepiločio orlaivio matavimų informacinėje sistemoje taikomų matavimų duomenų apdorojimo metodų naudojimas sprendžiant matavimų informacijos saugos uždavinius.
4. Kalmano filtravimo metodu paremtas bepiločių orlaivių matavimų informacijos klaidų suradimas ir pašalinimas.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į Thomson ISI Web of Science sąrašą (Stankūnas ir kt. 2011); du – recenzuojamuose žurnaluose (Rudinskas ir kt. 2009; Rudinskas ir Stankūnas 2009), trys – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose (Stankūnas ir Rudinskas 2010; Rudinskas 2008; Rudinskas ir Stankūnas 2008).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai aprobuoti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Respublikinėse konferencijose „Aviacija“ 2009 m. ir 2011 m. Vilniuje.

- Tarptautinėse konferencijose „Aviation“, 2008 m. ir 2010 m., Vilniuje,
- Tarptautinėse konferencijose „Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering – RRDPAE 2008“ 2008 m., Brno technologijos universitetas, Čekijos respublika,
- Tarptautinėje konferencijoje „Research and Education in Aircraft Design – READ 2010“, 2010 m., Varšuvos technologijos universitetas, Lenkija.

Disertacijos struktūra

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

Darbo apimtis yra 76 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 33 numeruotos formulės, 48 paveikslai ir 2 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudotas 61 literatūros šaltinis.

Matavimų duomenų apdorojimo metodų orlaivio integruotos diagnostikos sistemose apžvalga

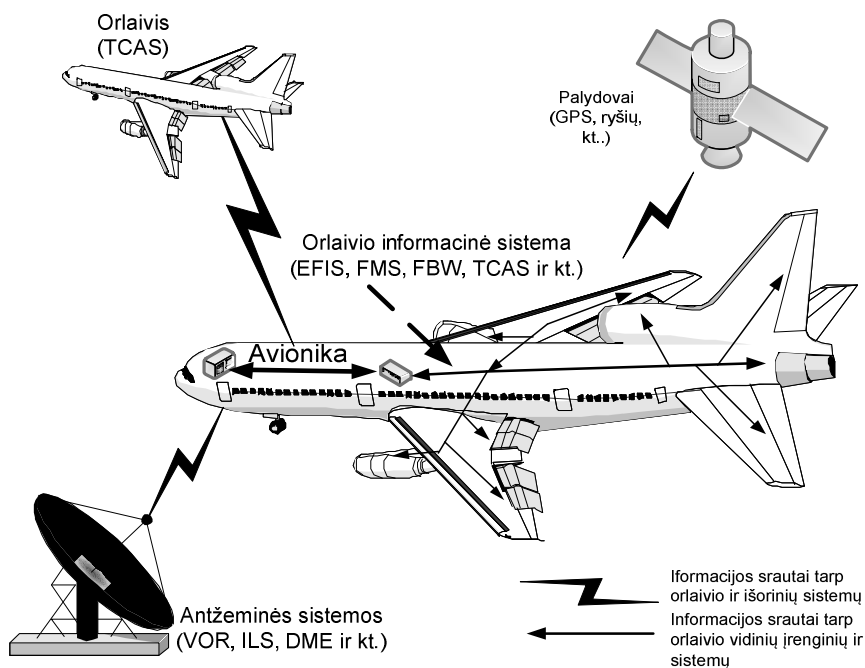
Šiame skyriuje analizuojamos orlaivio integruotos diagnostikos sistemos (OIDS). Orlaivis analizuojamas kaip matavimų informacinė sistema (MIS), kurioje įdiegti matavimų duomenų apdorojimo algoritmai. Aprašyti MIS matavimų duomenų apdorojimo ir klaidų nustatymo principai orlaiviuose ir bepiločiuose skraidymo aparatuose.

Šiame skyriuje pateikta medžiaga išleista konferencijos „*Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and its Influence on Education*“ pranešimų medžiagoje (Rudinskas ir Stankūnas 2008).

1.1. Orlaivio ryšių sistemų apžvalga

Šiuolaikiniuose orlaiviuose pilotų darbui palengvinti ir skrydžio saugai užtikrinti, o autonominiuose ir bepiločiuose orlaiviuose skrydžiui palaikyti, naudojamos integruotos elektroninės prietaisų ir įrengimų sistemos, integruota transporto priemonės techninės būklės valdymo IVHM sistemos, kurios tarpusavyje sujungtos ryšių linijomis, taip sudarydamos vieningą ryšių sistemą. Kiekviena

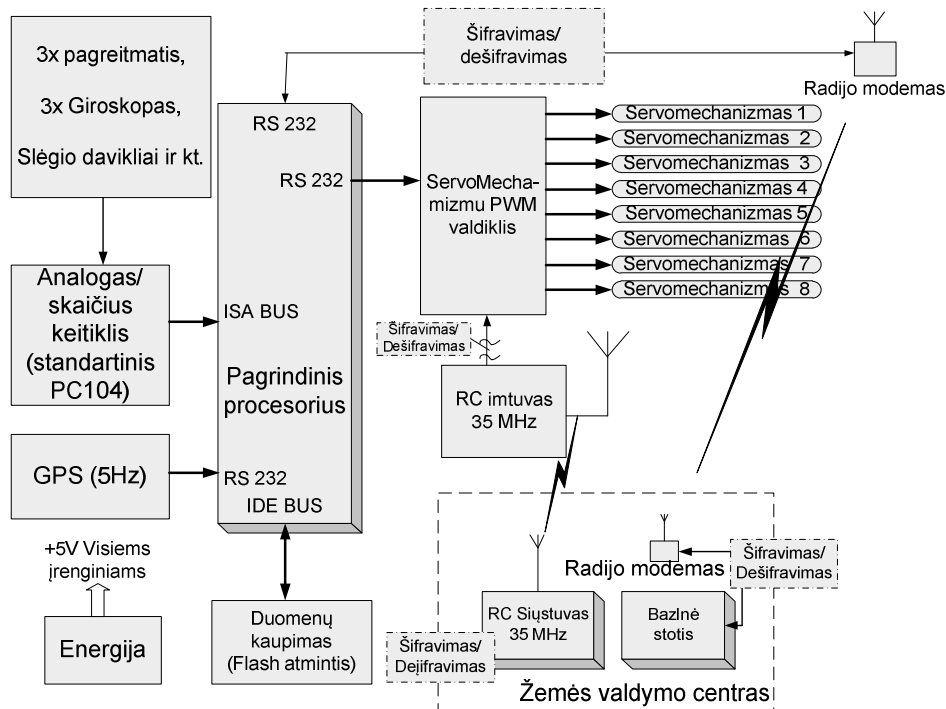
IVHM sistemos dalis priima ir persiunčia tam tikrą informaciją – vyksta informacijos mainai tarp atskirų IVHM sistemos dalių, o taip pat ir tarp orlaivio ir žemės arba kito orlaivio. Civiliuose ir kariniuose orlaiviuose taikomi duomenų perdavimo standartai tarp orlaivio sistemų (ARINC 429, ARINC 629, ARINC 664, MIL-STD 1553, MIL-STD 1773, STANAG 3910 ir kt.) ir išorinių sistemų (TCAS, ACARS, DME, ILS ir kt.) (1.1 pav.) yra griežtai determinuoti, o perduodami duomenys papildomai nesaugomi (Davis 2010). Vykstant tokiems informacijos mainams, būtina užtikrinti perduodamos informacijos vientisumą, bei saugoti ją nuo sugadinimo ar praradimo. Tai ypač aktualu kariniams orlaiviams, bepiločiams ir autonominiams skraidymo aparatams (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) (Parkinson 2009). Šių uždavinių sprendimui nagrinėjami informacijos saugos klausimai (Olive *et al.* 2006).



1.1 pav. Informacijos srautai
Fig. 1.1. Flows of information

Orlaivio skrydžio metu identifikuojame dvi informacijos srautų grupės (1.1 pav.) – informacijos srautai tarp orlaivio sistemų (orlaivio informacinė sistema) ir informacijos srautai tarp išorinių sistemų (oro uostas, meteorologijos tarnyba, palydovinis ryšys, ryšys su kitais orlaiviais). Taip pat galimi informacijos srautai

tarp keleivių ir telekomunikacijų paslaugas teikiančių bendrovių, kurių įranga sumontuota orlaivyje (Olive *et al.* 2006). Siekiant užtikrinti informacijos srautų tarp orlaivio ir kitų sistemų saugumą, reikia nustatyti sistemos saugumo lygį, sudaryti galimų grėsmių sąrašus, modeliuoti įvairius pažeidimų scenarijus. Šiems tikslams pasiekti, jau projektuojant konkrečią sistemą reikia numatyti informacijos saugos metodus ir priemones. Vieni iš metodų gali būti informacijos saugos priemonės taikomos telekomunikacijų tinkluose, atsparūs trikdžiams diagnostikos, prognostikos, CBM ir kt. algoritmai (Olive *et al.* 2007), taip pat į ryšio kanalą įterpiančios papildomos duomenų saugos priemonės (Rudinskas ir kt. 2009; Rudinskas ir Stankūnas 2009) (1.2 pav.).



1.2 pav. Nepilnuojamo orlaivio „SAMONIT“ struktūrinė schema (Rudinskas ir kt. 2009)

Fig. 1.2. Structural scheme of UAV „SAMONIT“ (Rudinskas ir kt. 2009)

Aptartomis orlaivio ryšių sistemomis yra perduodami orlaivio valdymui (orlaivio padėties ore išlaikymas ir judėjimo greičio palaikymas) reikalingi išorinių sistemų duomenys, lakūnų komandos orlaivio įrenginiams, vidinių įrenginių matavimų informacija.

1.2. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų koncepcija ir veikimo principas

Techninė diagnostika yra pagrindinė priemonė transporto priemonės negendamumui ir saugiai eksploatacijai užtikrinti. Paprastai techninė diagnostika atliekama neardomos kontrolės ir fizikinės analizės metodais (Žiliukas 1998).

Techninė kontrolė, tai tikrinimas, kaip sistemos mazgų dalys atitinka nustatytus techninius reikalavimus. Ypatingą reikšmę turi kontrolė, kuri atliekama įrenginio eksploatacijos metu. Išskiriamos eksploatacijos kontrolės rūšys:

- Funkcionuojančio gaminio parametrų kontrolė nustatant reikiamus darbo režimus ir panaudojant atitinkamas kontrolės priemones;
- Periodinė funkcionavimo ir tvarkingumo kontrolė panaudojant prietaisų skyde esančius prietaisus;
- Gaminio dabartinių parametrų kontrolė panaudojant borto ir įspėjamosios signalizacijos įrangą.

Integruotos techninės diagnostikos sistemomis yra laikomos sistemos, kurios surinkdamos ir apdorojamos išorinių jutiklių duomenis nustato, atpažįsta, taiso arba izoliuoja klaidas arba gedimus (Isermann 2006) ir teikia atitinkamas ataskaitas (MacConnell 2007; Beshears and Butler 2005; Mehr *et al.* 2005; Witczak 2007).

Integruotos techninės diagnostikos era prasidėjo dar 1950 m. kai orlaiviuose buvo tik analoginės sistemos (Bird *et al.* 2005). Apie įrenginių funkcionavimą signalizuodavo pilotų kabinoje sumontuoti šviesiniai ir garsiniai indikatoriai. O integruota techninė diagnostika atliekama „Įjunk ir testuok“ arba „veikia/neveikia–veikia“ testais. Taikomas testavimo mechanizmas labai paprastas. Paspaudus mygtuką, į testuojamą įrenginį paduodama elektros srovė, ir jei įrenginys veikiantis, užsidega žalia lemputė, jei ne – raudona. Kitokie matavimai nebuvo atliekami.

Analoginių diagnostikos sistemų era yra priskiriama pirmos kartos integruotomis techninės diagnostikos sistemoms (Bird *et al.* 2005).

Skaitmeninė integruotos techninės diagnostikos sistemų era prasidėjo kartu su masiniu skaitmeninės technikos panaudojimui. Apie 1980 m. pradėtos naudoti skaitmeninės integruotos techninės diagnostikos sistemos panaudojant tam tikrą aparatinę ir programinę įrangą. Pirmieji tokie įrenginiai buvo autonominiai į bendrą magistralę prijungiami įrenginiai, turintys tam skirtą prietaisų skydą su reikalingais jungikliais ir atvaizdavimo elementais (lemputės, simboliniai ekranai ir kt.) (Bird *et al.* 2005; James *et al.* 2003).

Aštuntojo dešimtmečio viduryje pradėtos taikyti keletui į bendrą magistralę sujungtų įrenginių centralizuotos atvaizdavimo panelės. Aštuntojo dešimtmečio pabaigoje, devintojo pradžioje pradėti naudoti centralizuoti kompiuteriai, kurie rūpinosi orlaivio integruotąja technine priežiūra, įvairių jutiklių duomenų sulie-

Jimas, klaidų aptikimu, prognozavimo uždavinių sprendimu ir kitoms funkcijoms (Bird *et al.* 2005). Šiuolaikiniai orlaiviai turi integruotosios techninės diagnostikos sistemos gebančias aptikti orlaivio sistemų klaidas, įrenginių gedimus ar orlaivio struktūros pažeidimus (Ducard 2009), atlikti klaidų taisymą ar jų izoliavimą nuo sistemos, taip užtikrinant sistemos funkcionalumą ir skrydžio misijos sėkmę. Integruotos techninės diagnostikos sistemos tapo vienos iš orlaivių patikimumą ir saugą didinančių priemonių.

IVHM yra sparčiai besivystanti sritis. Nors techninės būklės palaikymo sistemų koncepcija yra nenauja, dabartiniai jutikliai ir jutiklių technologijos (sumažėjusi jutiklių kaina, padidėjęs jų tarnavimo laikas, bei didesni reikalavimai orlaivių saugumui, tai ypač aktualu bepiločiams skraidymo aparatams integruojantis į bendrąją oro erdvę) atnaujina susidomėjimą IVHM sistemomis.

Sukurta daug įvairių integruotos diagnostikos sistemų: klaidų nustatymas ir identifikavimas (FDI – Fault Detection and Identification), klaidų nustatymas izoliavimas ir atstatymas (FDIR – Fault Detection and Isolation & Recovery), integruotos testavimo priemonės (BITE – Built-In Test Equipment), integruotas sistemos techninės būklės palaikymas (ISHM – Integrated Systems Health Management), posistemų techninės būklės palaikymas (SHM – Subsystems Health Management) ir kt. atliekančių konkrečių įrenginių, atskiro sistemos mazgo ar visos sistemos techninę būklę (Beshears ir Butler 2005; Mehr ir Tumer 2005; Isermann 2006; Ducard 2009).

1.3. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų tarpusavio sąsajų apžvalga

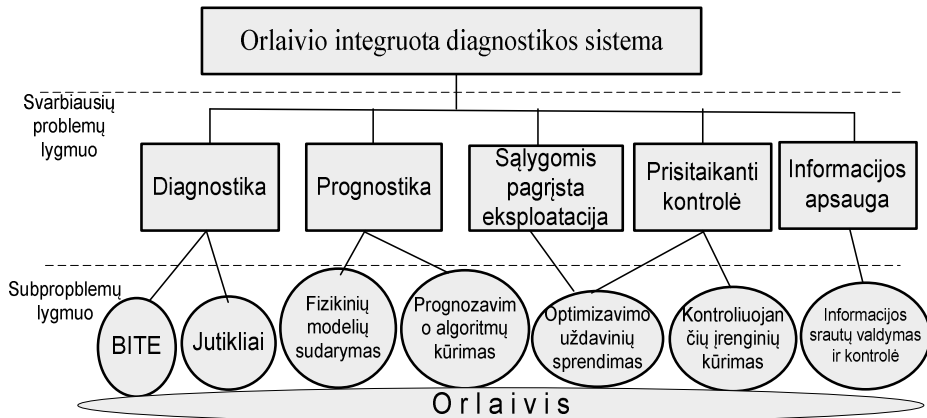
Projektuojant ir gaminant vis sudėtingesnius orlaivius, darosi sudėtinga užtikrinti visų sistemų nepriekaištingą darbą. Dėl labai sudėtingų sistemų, aptarnaujančiam personalui kartais tampa sudėtinga identifikuoti tikrąsias orlaivio sistemų gedimo priežastis. Nors pilotų kabinoje yra daugybė įvairių apie orlaivio būklę informuojančių prietaisų, dėl matavimų informacijos gausos ir kartais prieštarinčių parodymu darosi sunku nustatyti tikrąsias gedimo priežastis. Neretai pasitaiko, kad pilotų kabinoje esantys prietaisai rodo prieštarinę informaciją apie orlaivio būklę ir pateikiama tiesioginė informacija apie vieną ar kitą gedimą nesuteikia tikrosios informacijos apie tikrąją gedimo priežastį. Tam tikslui reikalinga vieninga informacijos kaupimo, analizės, vieningos orlaivio techninės būklės vertinimo ir sprendimų pateikimo sistema, kuri palengvintų sprendimų priėmimą pilotams ir aptarnaujančiam personalui.

Pagrindiniai IVHM tikslai yra surinkti ir apdoroti išorinių jutiklių duomenis, aptikti ir izoliuoti klaidas, bei apie jas informuoti pilotus, kritinėse situacijose padėti pilotams priimti teisingus sprendimus, taip sumažinant katastrofos riziką.

IVHM galima skirstyti į dvi grupes, IVHM po skrydžio ir IVHM skrydžio metu (Fudge *et al* 2003). Tačiau siekiant galutinio tikslo IVHM sistemos projektavimo uždavinys suskaidomas į penkias analitines sritis, kurios sudaro svarbiausių problemų lygmenį (1.3 pav.):

- Diagnostikos (problemos priežasties nustatymas);
- Prognozavimo (sistemos būklės nustatymas remiantis dabartiniais ir sukauptais matavimų duomenimis);
- Sąlygomis pagrįsta eksploatacija (orlaivio sistemų ir mazgų eksploatacinių sąlygų palaikymas nagrinėjant ne maksimalaus skrydžio laiko ar blogiausių įvykių sekos variantus);
- Prisitaikanti (adaptyvi) kontrolė (aprūpinimas priemonėmis, leidžiančiomis užbaigti misiją, nepaisant sistemos gedimų);
- Informacijos sauga (orlaivio informacinės sistemos sauga).

Kiekvienas svarbiausių problemų lygmens nagrinėjamas uždavinys skaidomas į mažesnius uždavinius, kurie reikalingi pilnam svarbiausių problemų lygmens uždavinių sprendimui (1.3 pav.).



1.3 pav. Sprendžiamų probleminių OIDS uždavinių skirstymas į grupes
Fig. 1.3. Problem OIDS task division into groups

Kiekvienos problemos sprendimo uždavinius išnagrinėkime detaliau.

Diagnostika siejama su technologijų ir procesų naudojimu duomenų rinkimui, siejimui ir analizei apie sistemos klaidas. Norint kontroliuoti įvairių orlai-

vio sistemų ir mazgų darbą, reikia instaliuoti jutiklius, kurie atlieka fizikinių parametrų matavimą, o matavimo rezultatus perduoda tolimesnėms sistemoms, kurios kaupia ir analizuoja surinktus duomenis. Jutiklių integravimas neapsiriboja vien tik jutiklio įdiegimu tam tikrame taške. Nagrinėjami ir kiti su jutikliais susiję klausimai:

- Nustatomi, kurie sistemos fizikiniai parametrai turi būti matuojami (temperatūra, slėgis, oro srautas ir kt.);
- Fizikinio parametro matavimo būdas;
- Jutiklio charakteristikos (tikslumas, jutiklio matmenys, elektrinės charakteristikos ir kt.);
- Konkreti jutiklio sumontavimo vieta;

Be su jutikliais susijusių klausimų, nagrinėjama ir kita svarbi diagnostikos klausimų grupė – integruoti testavimo įrenginiai (BITE) atliekantys sistemos ar mazgo savikontrolės funkciją (Mesick *et al* 1999; Fudge *et al* 2003).

Sukauptos informacijos apdorojimui taikomos jau žinomos diagnozavimo schemos – hierarchinio grupavimo, Bajėso tikimybių tinklo schemos, paslėptieji Markovo modeliai, Fuzzy logika, Kalmano filtrai (Kacprzyński 2002; Mosallaei ir Salahshoor 2008; Sasiadek ir Hartana 2000; Callan *et al* 2006; Camci ir Chinnam 2006; Ducard 2009), kurių realizavimui taikomi sudėtingi matematiniai aparatai: dirbtinių neuronų tinklai, palaikančių vektorių mašinos, statistinės analizės metodai (Baruah *et al* 2006; Lebold ir Thurston 2001; Clark *et al* 2007; Ducard 2009).

Deramas diagnostikos naudojimas greitina priežiūrą ir gerina orlaivio sistemų eksploatacines savybes. Orlaivio techninės būklės palaikymui (AHM – Aircraft Health Management) naudojami duomenys iš orlaivio centrinio kompiuterio ir elektroninio orlaivio įvykių žurnalo. Surinkti duomenys apdorojami, kad nustatyti galimus gedimus ir būtų imamasi atitinkamų priemonių gedimui pašalinti arba izoliuoti.

Prognostika apima sistemos būsimos būklės prognozavimą, vertindama dabartinę sistemos būklę ir istorinius duomenis. Surinkti duomenys perduodami prognozavimo algoritmui. Prognozavimo algoritmas iš surinktų duomenų apie dabartinę orlaivio sistemų būklę, leidžia laiku nustatyti galimus gedimus, juos pašalinti ir taip prailginti sistemos eksploataciją. Jei prognozavimo algoritmai parodys, kad mažėja komponento eksploatacijos laikas, komponentas bus pakeistas kitu. Prognostikos efektyvumas priklauso nuo prognozavimo algoritmų tobulumo. Siekiant kiek galima tikslesnių prognozavimo rezultatų, kuriami sudėtingi, prognozavimo algoritmai, kurie įvertina ne tik sukauptus jutiklių duomenis, bet ir sudarytus fizikinių procesų modelius. Fizikinio modelio tikslumas turi įtakos prognozavimo rezultato tikslumui (Lebold ir Thurston 2001; Kacprzyński 2002; Camci ir Chinnam 2006).

Sąlygomis pagrįsta eksploatacija (CBM – Condition-Based-Maintenance) yra eksploataavimo technologija, kuri naudoja tokias užduotis kaip kontroliavimas, klasifikacija, ir prognozė, siekiant pagerinti sistemos pasiruošimą darbui ir saugumą, mažinant eksploatacijos kaštus. Skirtingai nuo planinio profilaktinio patikrinimo ir remonto darbų, CBM siekia išvengti abiejų nereikalingų aptarnavimo veiksmų, taip pat siekiama išvengti įrenginių gedimų (Camci ir Chinnam 2006). Tam kad tinkamai CBM atliktų sistemos ar įrenginių eksploataciją, reikalingas efektyvus diagnostikos ir prognostikos algoritmų panaudojimas, bei patikima ir saugi programinė įranga (Olive *et al* 2006; Lebold ir Thurston 2001).

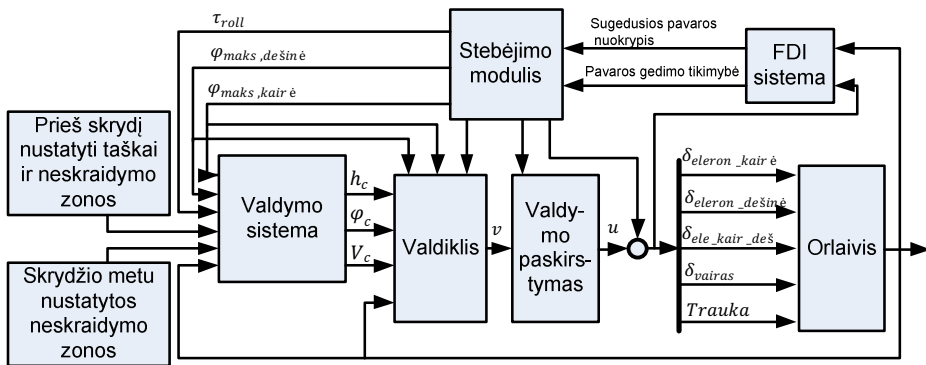
Adaptyvi kontrolė IVHM gali padėti orlaivio įgulai užbaigti misiją nepaisant tam tikrų sistemų pakenkimo ar kontroliuoti sistemos sutrikimus. Kadangi orlaiviai ir kosminės platformos vis labiau technologiškai pažangios, tai net patyrusiems pilotams tampa sunkiau panaudoti visus sistemos teikiamus duomenis. IVHM, susietas su adaptyvios kontrolės įtaisais, gali nustatyti sistemos būklę ir parinkti optimalius įrenginių valdymo režimus.

Informacijos sauga – nesaugoti orlaivio valdymui reikalingi duomenys (navigacijos duomenys, kontrolės duomenys, įrenginių parametrų matavimų duomenys ir kt.) gali tapti puikiu sabotažo objektu ir turėti neigiamos įtakos tiek orlaivio valdymui, tiek misijos sėkmei, todėl reikia užtikrinti pakankamą orlaivio informacinės sistemos (Sampigethaya *et al* 2008a, Sampigethaya *et al* 2008b) ir orlaivio skrydžio parametrų išlaikymą užtikrinančios matavimų informacijos saugą. Tam tikslui reikia parinkti atitinkamas fizines, aparatinės ir metodines informacijos saugos priemones.

Integruotos techninės diagnostikos priemonių diegimas svarbus ne tik dideliams orlaiviams, bet ir mažiems skraidymo aparatams, ypač nepilotuojamiems. Pagal Eurokontrolę, mažais UAV laikomi orlaiviai, kurių bendroji masė neviršija 25 kg (CARE 2001). Į tokio dydžio orlaivius yra pakankamai sudėtinga integruoti papildomas informacijos saugos priemones, kurios dažnai reikalauja papildomų techninių sprendimų.

Literatūroje pateikiama daug pavyzdžių, kur bepiločiuose orlaiviuose diegiamos FDI sistemos. Vienas iš sėkmingų pavyzdžių yra Drozeski ir kitų pristatomas autonominio sraigtasparnio FDI sistemos paremtos dirbtinių neuronų tinklo taikymu perkonfigūruojamoje skrydžio valdymo sistemoje (Drozeski *et al* 2005a; Drozeski *et al* 2005b), Heredia ir kitų darbuose FDI sistemos diegimas mažuose nepilotuojamuose sraigtasparniuose (Heredia *et al* 2008).

Kadangi nepilotuojamas orlaivis yra aprūpintas pilna elektronine valdymo ir kontrolės įranga, o orlaivio valdymas atliekamas nuotoliniu arba automatinio būdu, tai integruotos techninės diagnostikos ir skrydžio valdymo sistemų tarpusavio sąsaja yra neišvengiama (1.4 pav.).



1.4 pav. Klaidoms tolerantiška skrydžių valdymo ir kontrolės sistema (Ducard 2009)

Fig. 1.4. Fault tolerant guidance and control system (Ducard 2009)

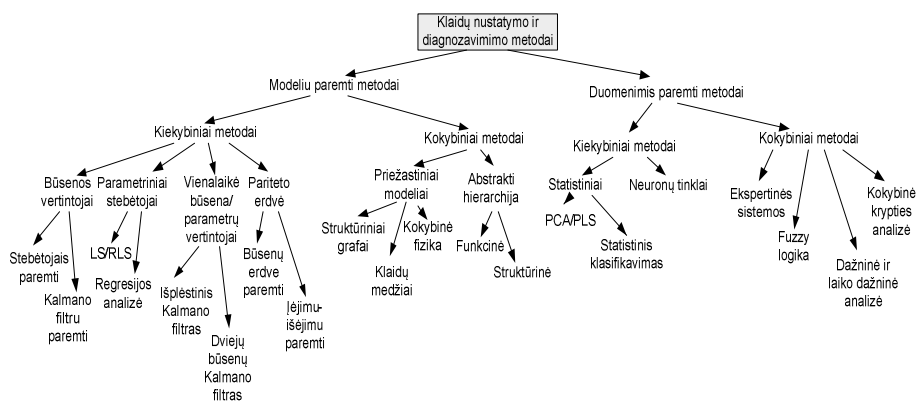
Ducard pasiūlė klaidoms tolerantišką skrydžių valdymo ir kontrolės sistemą (1.4 pav.), kurioje integruotas aktyvusis realiu laiku nedidelių skaičiavimo pajėgumų reikalaujantis klaidų nustatymo algoritmas paremtas išplėstiniu Kalmano filtru (Ducard 2009), o orlaivio valdymui naudojama apibendrinta informacija. Tokios sistemos trūkumas – nėra papildomų informacijos saugumą užtikrinančių priemonių.

1.4. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų matavimų duomenų apdorojimo ir klaidų nustatymo metodų apžvalga

Klaidų nustatymas ir identifikavimas yra svarbi ir įdomi daugelio inžinerinių taikymų problema. Orlaivio integruotos diagnostikos sistemomis, matavimų duomenų apdorojimu ir perkonfigūruojama klaidoms atsparia įranga pradėta domėtis dar 1971 metais kai Masačusetso technologijų instituto doktorantas Richard Vernon Beard savo disertacijoje „*Failure accommodation in linear systems through self-reorganization*“ pirmasis pasiūlė klaidų nustatymo filtro koncepciją, kur vietoje fizinio aparatinės įrangos dubliavimo pritaikytas analitinis dubliavimas remiantis matavimų informacija leidžia sistemai save perorganizuoti išlaikant bendrą sistemos stabilumą (Beard 1971).

Per pastarąjį dešimtmetį klaidų nustatymo, identifikavimo ir kontrolerio perkonfigūravimo srityje atlikta nemažai tyrimų ir pateikta taikymų pavyzdžių (Inseok *et al* 2010; Zhang ir Jiang 2008).

Detali perkonfigūruojamų klaidoms atsparių valdymo sistemų (FTCS – Fault Tolerant Control System), klaidų aptikimo ir nustatymo (FDD – Fault Detections and Diagnosis), pasyvių klaidoms atsparių valdymo sistemų (PFTCS – Passive Fault Tolerant Control System) ir aktyvių klaidoms atsparių valdymo sistemų (AFTCS – Active Fault Tolerant Control System) bibliografinė apžvalga apimanti 1971 m. – 2007 m. pateikta Youmin Zhang ir Jin Jiang darbe „*Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems*“ (Zhang ir Jiang 2008). Minėtame darbe pateikta 376 recenzuojamuose leidiniuose publikuoti moksliniai tiriamieji darbai FDD srityje. Taip pat pateikiama FDD metodų klasifikacija (1.5 pav.).



1.5 pav. FDD metodų klasifikacija (Zhang ir Jiang 2008)

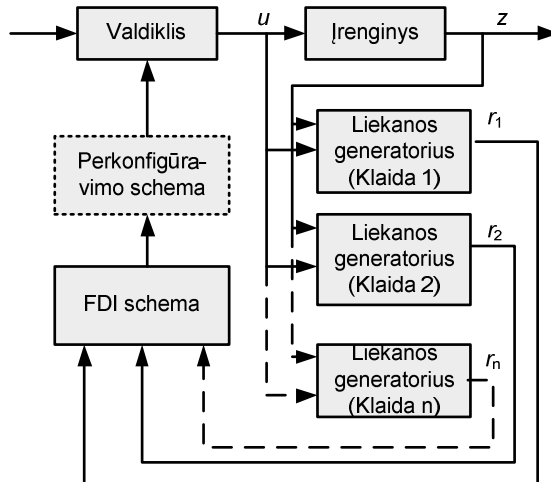
Fig. 1.5. FDD methods' classification

Autoriai įvairiais kriterijais pateikia klaidoms atsparių sistemų projektavimo ir taikymų perspektyvas. Iš autorių Zhang ir Jiang atliktos apžvalgos matyti, kad perspektyvoje numatomas didesnis dėmesys AFTCS projektavimui netiesinėms sistemoms. Bendru atveju klaidų nustatymo metodus galima klasifikuoti į dvi grupes – modelio nereikalaujančios ir modelio reikalaujančios paradigmos. Modelio nereikalaujančių klaidų nustatymo sistemų pagrindas paremtas didelio kiekio matavimų duomenų sukaupimu ir analize. Modelio reikalaujantys klaidų nustatymo metodai paremti tam tikrais sistemos dinaminio proceso matematiniais aprašymais.

Naujos kartos perkonfigūruojamos skrydžio valdymo sistemos priklausys ne vien tik nuo gedimams atsparių valdiklių, bet apims pilnai integruotas sistemas, kurios perkonfigūruos skrydžio kontrolierius, pritaikys skrydžio valdymo sistemą ir performuos skrydžio trajektoriją (Schierman *et al* 2004). Minėtos sistemos (viena tokių pateikta 1.4 pav.) neįmanomos be FDI modulio. FDI modulio vei-

kinas paremtas rekursinių filtravimo algoritmų taikymu, kur naudojant atliktų matavimų duomenų ir sistemos modelio analizę yra nustatomos įvykusios klaidos, bei atliekama klaidingų matavimų rezultatų izoliacija nuo tolimesnio jų panaudojimo (Ducard 2009). Norint nustatyti klaidas reikalingas visos sistemos veikimo ir orlaivio elgsenos stebėjimas, taip pat dinaminių procesų žinios. Dažniausiai klaidos nustatomos analizuojant vadinamąsias liekanas, tai skirtumai tarp sistemos išmatuotų parametrų ir sistemos matematinio modelio teikiamų rezultatų. Liekanų generavimas atliekamas įvairiais metodais: pariteto lygtys (Gertler 1997), stebėtojų paremti liekanų generavimo metodai (Patton ir Chen 1997), parametrų vertinimu, dirbtinių neuronų tinklais ir Fuzzy sistemomis (Patton *et al.* 2000).

Klaidų nustatymui gali būti taikoma liekanos generavimo technika, statistinio sprendimo priėmimo technika ir perkonfigūruojama valdymo technika (Insek *et al* 2010). Detaliau paanalizuokime liekanos generavimo techniką analitiniu dubliavimu paremtoje (arba modeliu paremta) FDI sistemoje (1.6 pav.). Praktikoje taikomi keli liekanos generavimo metodai – pilnos būsenos stebėtojo pagrindo metodai, nežinomo įėjimo stebėtojas, pariteto sąsajos metodai, sistemos būsenos optimizavimu paremti metodai, Kalmano filtro metodai, statistinės analizės metodai, dirbtinio intelekto metodai ir kt.



1.6 pav. Klaidų nustatymo, izoliavimo ir perkonfigūravimo schema

Fig. 1.6. Fault detection, isolation and reconfiguration scheme

Šiuolaikinio orlaivio sistemose integruota daugybė įvairių jutiklių ir matavimo prietaisų, užtikrinančių sklandų techninės įrangos veikimą. Saugų skrydį

užtikrina klaidų aptikimo ir nustatymo algoritmai integruoti į skrydžio valdymo sistemas. Toliau atlikime šių sistemų apžvalgą. Tirsime kokio tipo klaidos aptinkamos ir kaip su jomis toliau elgiamasi.

Patikima FDI sistema pateikia tikslias žinias apie orlaivio techninę būklę. Norint pasiekti šį rezultatą FDI sistema turi būti atspari išoriniams trikdžiams, įrangos modulių netikslumams, išorinių įrenginių sukeliamam jutiklių matavimų triukšmui ir panašiai. FDI sistemos neturi sukelti klaidingų pavojaus signalų, tačiau turėtų būti pakankamai jautrios, kad aptiktų matuojamų parametrų nukrypimus taip pat nukrypimo nuo normos tendencijas, klaidas ir gedimus. Šiuolaikinės FDI sistemos paremtos neuroniniais tinklais, atraminių vektorių modeliais, genetiniais algoritmais. Taip pat dažnai naudojami gedimų medžiai, įvairūs analitiniai metodai. Dažnai kuriant klaidų diagnozės sistemas reikalaujami tikslūs proceso modeliai, kokybiniai ir kiekybiniai modeliai. Taip pat yra naudojami metodai, kurie paremti sukaupta informacija apie proceso duomenis.

Galima išskirti dvi gedimams atsparių valdymo sistemų rūšis – pasyvios ir aktyvios FDI sistemos. Pasyvios FDI sistemos „laukia“ kol gedimas įvyks (Hearns *et al* 1998), o aktyvios FDI sistemos dirbtinai „sudirgina“ orlaivį, atlikdamos būklės patikrinimo procedūras (Azam *et al* 2005), arba įterpdamos patikros signalus į valdymo komandas ir taip įvertindamos individualių pavarų ir jutiklių būklę (Bateman *et al* 2008; Bateman *et al* 2007; Ducard *et al* 2008; Boskovic *et al* 2007; Ducard ir Geering 2006).

Toliau analizuokime tik aktyvias gedimams atsparias sistemas, kurios dažniausiai turi atskirą modulį – FDI schemą, kuri stebi orlaivio būklę (1.5 pav.). FDI sistema informuoja valdiklį apie klaidos ar gedimo rimtumą. Po to valdantis modulis gali nuspręsti pakeisti skrydžio, skrydžio valdiklio, valdymo ar navigacijos sistemų konfigūraciją.

Dažniausiai FDI sistemose taikomi parametrų vertinimo ir stebėjimais paremti klaidų nustatymo metodai. Taip pat pastarųjų metų darbuose UAV diegiamose FDI sistemose taikomi stebėtojai paremti klaidų nustatymo metodai. Pagrindinė idėja prieš stebėtojai ar filtrai paremtų metodų taikymus yra sistemos išėjimo matavimų duomenų vertinimas taikant Luenbergo stebėtoją (determinuotoje aplinkoje) arba Kalmano filtrą (stochastinėje aplinkoje).

Kalmano filtras yra ekvivalentus optimaliai tiesinės stochastinės sistemos prognozei, naudojamai *jėjimo* – *išėjimo* modeliuose. Dauguma modelių, kurie paremti laikinės funkcijos taikymu, naudojami tiesinėse sistemose. Jei reikia tokius modelius naudoti netiesinėse sistemose, juos reikia ištiesinti darbo taško aplinkoje.

Kalbant apie klaidų nustatymo ir identifikavimo metodus, reikia sudaryti kiek galima tikslesnį MIS galimų klaidų modelį.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus disertacijos tema literatūros analizę, nustatyta kad:

1. Orlaivio geros techninės būklės užtikrinimui projektuojamos įvairios techninės diagnostikos ir prognostikos sistemos. Taip pat šios sistemos plačiai pritaikomos ir bepiločiuose orlaiviuose. Integruotos skrydžio valdymo ir techninės diagnostikos sistemos yra perspektyvi tolimesnių tyrimų sritis.
2. Kuriant OIDS sprendžiamos penkios pagrindinių uždavinių grupės: diagnostika, prognostika, sąlygomis pagrįsta eksploatacija, adaptyvi kontrolė ir informacijos sauga. Kiekviena pagrindinė problema yra sudėtinga.
3. Orlaivį traktuojant kaip informacinę sistemą, kurioje yra matavimo informacijos šaltiniai, matavimo duomenų apdorojimas ir matavimų informacijos vartotojai, reikia imtis informacijos saugos priemonių. Tai ypatingai aktualu bepiločiams orlaiviams.
4. Vienas plačiai tyrinėjamas šiuolaikinių orlaivio valdymo būdų yra daugelio duomenų šaltinių matavimų informacijos suliejimo (apibendrinimo), klaidų nustatymo ir identifikavimo metodų taikymas, taip išskiriant reikiamą valdymo ar kontrolės parametą, nefunkcionuojančius jutiklius ir orlaivio įrenginius.
5. Taikant duomenų suliejimo metodus galima suprojektuoti tokią orlaivio valdymo sistemą, kuri būtų atspari atsiradusioms atsitiktinėms ir neatsitiktinėms klaidoms, taip išsaugant normaliam skrydžiui atlikti reikalingus parametrus – orlaivio padėtis ore, skridimo greitis ir kursas.
6. Informacijos saugos priemonės nesunku įdiegti dideliuose orlaiviuose, tačiau mažuose bepiločiuose orlaiviuose, šių priemonių diegimas yra komplikotas. Siekiant spręsti šią problemą yra tikslinga esamas orlaivio informacinės sistemas iširti per informacijos saugos priзмę.

Vertinant atliktos analizės rezultatus šio darbo uždaviniai yra:

1. Išanalizuoti kokie OIDS matavimų informacijos apdorojimo metodai ir priemonės taikomos bepiločiuose orlaiviuose.
2. Pasiūlyti bepiločio orlaivio integruoto valdymo ir diagnostikos sistemos matavimų informacijos saugos metodiką ir priemones.
3. Siūlomą metodiką iširti inovatyvioje matavimų duomenų surinkimo ir apdorojimo sistemoje diegiamoje bepiločiuose orlaiviuose.

Orlaivio integruotos diagnostikos sistemų matavimų duomenų apdorojimo metodai ir priemonės

Šiame skyriuje pateikiamas matavimų duomenų apdorojimo orlaivio integruotos diagnostikos sistemose metodai ir priemonės. Orlaivis traktuojamas kaip tinklinė valdymo sistema, kurioje įrenginių, proceso ir jutiklių triukšmai ir trikdžiai traktuojami kaip klaidos. Klaida laikomas nenumatytas bent vieno sistemos parametro ar charakteristikos nuokrypis nuo priimtinių ar sistemai būdingų parametrų.

Pateikiama IODS matavimų duomenų apdorojimo ir klaidų nustatymo metodų apžvalga. Analizuojama, kokie galimi klaidų tipai orlaivio MIS ir kaip atsiradusios klaidos įtakoja matavimų informacijos apdorojimo algoritmų išėjimo rezultatus.

Šio skyriaus medžiaga aprobuota Respublikinėje konferencijoje „Aviacija 2011“ ir publikuota žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ (Stankūnas et al 2011).

2.1. Kalmano filtravimo metodas

Remdamiesi pirmame skyriuje padarytomis išvadomis, kad orlaivio integruotose diagnostikos sistemose taikomas Kalmano filtravimo metodas, detaliau analizuokime, kaip Kalmano filtrai yra taikomi matavimų informacijos apdorojime ir klaidų nustatyme bei identifikavime. Taip pat įvertinkime ar šie metodai gali būti taikomi kaip matavimų informacijos saugos metodai.

Kalmano filtras yra rekursinis filtras, kuris pagal atliktų matavimų duomenis atlieka tiesinės dinaminės sistemos momentinės būsenos optimalų vertinimą, kuri yra veikiamą Gauso triukšmu su normaliuoju pasiskirstymu (Welch ir Bishop 2006). Kalmano filtras pagrinde yra skirtas proceso būsenos $x \in \mathcal{R}^n$ vertinimui, kur procesas aprašytas tiesinėmis diferencialinėmis lygtimis (vektorine ir matricine formomis):

$$\dot{x} = Fx + w \quad (2.1)$$

Kur x yra būsenos vektorius $x \in \mathcal{R}^n$. Kiekvienas šio vektoriaus kintamasis yra sistemos būseną aprašantis parametras. F yra sistemos matrica, kuri aprašo kaip sistemos būseną keičiasi laike. w yra atsitiktinis triukšmo vektorius apibūdinantis neapibrėžtumą ar patikimumą mūsų sistemos modelyje.

Kiekvienoje sistemoje naudojant įvairius jutiklius atliekami sistemos parametrų matavimai, kurie su sistemos būseną susieti tiesine priklausomybe:

$$z = Hx + v \quad (2.2)$$

Kur z yra matavimų vektorius. Matavimų vektoriaus kintamieji yra jutiklių išmatuotos reikšmės. H yra matavimų matrica, kurioje aprašomi sąryšiai tarp matavimų reikšmių ir sistemos būsenos. v yra atsitiktinis vektorius aprašantis matavimų triukšmą.

w ir v atitinkamai yra proceso ir matavimų triukšmo vektoriai. Proceso triukšmo ir matavimų triukšmo vektoriai yra baltasis Gauso triukšmas su nulio vidurkiu ir kovariacijų matrica randami atitinkamai pagal lygtis:

$$w \sim N(0, Q); v \sim N(0, R) \quad (2.3)$$

$$E[w w'] = Q; E[v v'] = R \quad (2.4)$$

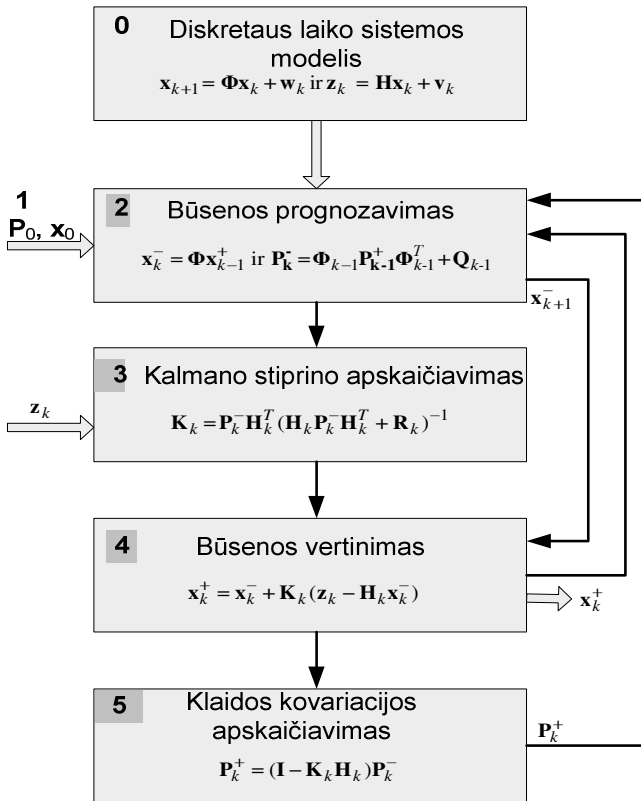
Pateiktos (1) ir (2) lygtys yra nenutrūkstamo laiko. Tačiau technikoje įvairūs matavimai atliekami tam tikrais diskrečiais laiko momentais t_k . Todėl (2.1) ir (2.2) lygtis transformuokime į diskretaus laiko sistemos proceso ir matavimų lygtis:

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (2.5)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2.6)$$

Kur $\mathbf{x}_k$ yra sistemos būsenos vektorius laiko momentu t_k , Φ_k yra būsenos perdavimo matrica, kuri aprašo kaip sistemos būsena laiko momentu t_{k+1} transformuojama iš sistemos būsenos laiko momentu t_k . Ji gali būti apskaičiuojama iš $\Phi_k = e^{F \cdot \Delta T} \approx \mathbf{I} + F \Delta T$, kur $\Delta T = t_{k+1} - t_k$ yra laiko žingsnis. $\mathbf{z}_k$ yra matavimų vektorius laiko momentu t_k . $\mathbf{H}_k$ yra matavimų matrica laiko momentu t_k .

Standartinis Kalmano filtravimo proceso algoritmas (2.1 pav.) sudarytas iš dviejų etapų – prognozavimo ir korekcijos, kurie atliekami per šešis etapus aprašytus žemiau.



2.1 pav. Kalmano filtravimo proceso algoritmas

Fig. 2.1. Algorithm for Kalman Filtering Process

0 etapas. Nustatomas diskretaus laiko sistemos modelis ir dinaminio proceso lygtys, matavimų lygtys ir susiję parametrai Φ_k , $\mathbf{Q}_k$, $\mathbf{H}_k$ ir $\mathbf{R}_k$.

1 etapas. Prieš pradėdant Kalmano filtravimo procesą, turi būti apibrėžtos pradinės būsenos $\mathbf{x}_0$ ir klaidos kovariacijos $\mathbf{P}_0$ matricos.

2 etapas. Įvertinta būsena $\mathbf{x}^+$ ir susijusi klaidos kovariacijos matrica $\mathbf{P}^+$ su Φ_k ir $\mathbf{Q}_k$ yra naudojami spėti sistemos būsenoms $\mathbf{x}^-$ kitame laiko momento žingsnyje t_k (kai laukiama įvyksta matavimams $\mathbf{z}_k$) ir apskaičiuoti susijusią klaidos kovariacijų matricą $\mathbf{P}^-$. Pradiniu momentu $t = 0$, $\mathbf{x}^+ = \mathbf{x}_0$ ir $\mathbf{P}^+ = \mathbf{P}_0$. Indeksas „-“ reiškia, kad šie parametrai yra prognozuojami.

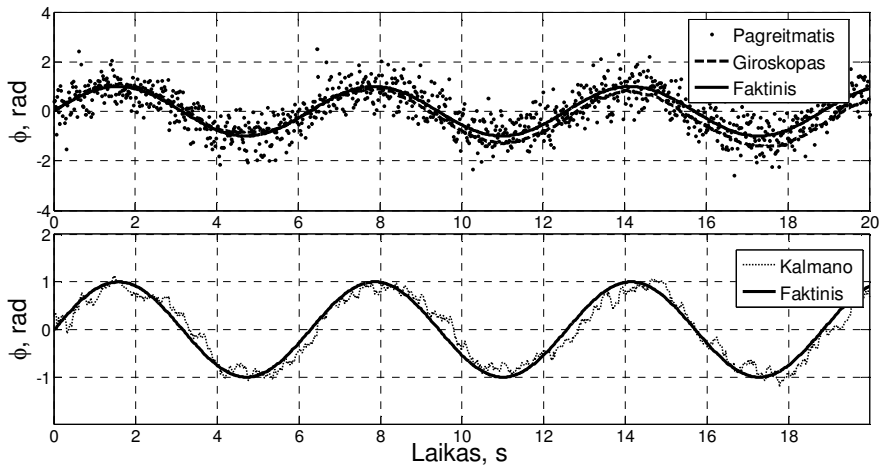
3 etapas. Kalmano stiprinimo matricos $\mathbf{K}_k$ apskaičiavimas panaudojus $\mathbf{P}^-$, $\mathbf{H}_k$ ir $\mathbf{R}_k$.

4 etapas. Laiko momentu t_k yra gaunama nauja matavimų seka $\mathbf{z}_k$. Matavimai $\mathbf{z}_k$ kartu su $\mathbf{K}_k$, $\mathbf{x}^-$ ir $\mathbf{H}_k$ yra įvertintos būsenos vektoriaus $\mathbf{x}_k^+$ apskaičiavimui. Indeksas „+“ parodo, kad parametras yra įvertinimai, apskaičiuoti panaudojus esamus matavimus $\mathbf{z}_k$.

5 etapas. Identiškos matricos $\mathbf{I}$, $\mathbf{K}_k$, $\mathbf{H}_k$, $\mathbf{P}^-$ yra panaudotos apskaičiuojant įvertinimo klaidos kovariacijų matricą $\mathbf{P}^+$.

Šie procesai kartojami nuo 2 iki 5 žingsnio. Aptartas matavimų informacijos apdorojimas ir sistemos būsenos vertinimas dar vadinamas diskrečiuoju Kalmano filtru.

Kalmano filtro veikimui patikrinti sumodeliuokime orlaivio polinkio kampo matavimų duomenų suliejimą naudojant pagreitmačio ir giroskopinio daviklio matavimų duomenis (2.2 pav.).



2.2 pav. Polinkio kampo vertinimas taikant pagreitmačio ir giroskopinio jutiklio duomenų suliejimą Kalmano filtru

Fig. 2.2. Pitch estimation using accelerometer and gyros data fusion with Kalman filter

Orlaivio polinkio kampo modeliavimui panaudoti pagreitmačio ir giroskopinio daviklių matavimų duomenys. Daviklių matavimų rezultatai veikiami tik

baltojo triukšmo, kurį Kalmano filtras optimaliai pašalina. Aptartu atveju matavimų sistema veikia be jutiklių ar sisteminių klaidų.

Šiam filtrui reikalingos žinios apie sistemos būseną ir būsenos kitimo procesą. Taip pat reikalingos pradinės žinios apie sistemos būseną bei jos kovariaciją. Be to klasikinis KF metodas taikomas tik tiesinėms sistemoms. Netiesinėms sistemoms taikomas išplėstasis Kalmano filtras (EKF – Extended Kalman Filter), „Unscented“ Kalmano filtras (UKF – Unscented Kalman Filter). EKF atveju netiesinės sistemos būsena ištiesinama darbo taško aplinkoje taikant pirmos eilės Teiloro eilučių skleidimą.

2.2. „Unscented“ Kalmano filtravimo algoritmas

Vienas pagrindinių ir reikšmingiausių standartinio Kalmano filtro algoritmo reikalavimų yra tas, kad sistemos proceso ir matavimų modeliai ((2.1) ir (2.2) lygtys) yra tiesinės lygtys. Vis dėlto realiame pasaulyje dažniausiai pasitaiko netiesiniai procesai ir netiesinės jų matavimų lygtys. Todėl šiai problemai spręsti reikalingas standartinio Kalmano filtro pritaikymas netiesinėms sistemoms.

Tam tikslui buvo naudojamas išplėstasis Kalmano filtras. EKF yra paremtas netiesinio sistemos modelio ištiesinimu apie charakteringus taškus taikant Teiloro eilučių skleidimą. EKF turi vieną reikšmingą trūkumą – esant stipriai netiesiniai sistemos modeliai, staiga blogėja Kalmano filtro savybės. Šis EKF trūkumas buvo pašalintas pritaikius „unscented“ transformaciją (UT). UT taikoma tariant, kad lengviau aproksimuoti tikimybės pasiskirstymą nei pasirenkamą netiesinę funkciją ar jos transformaciją. Vietoj to, kad netiesinis modelis EKF atveju ištiesinamas darbo aplinkoje ir tuomet aproksimuojamas, tai UKF atveju sugeneruojamas baigtinis skaičius atrinktų taškų dar vadinamų *sigma taškais*. Šie sigma taškai naudojant netiesinę sistemą transformuojami į naują taškų seką. Sistemos būsena ir susijusios klaidų kovariacijų matricos yra determinuotai paremtos transformuotų sigma taškų vidurkio ir kovariacijų reikšmėmis. Tarkime, kad mūsų netiesinės diskretaus laiko sistemos modelis aprašomas lygtimis:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{t}_k) + \mathbf{w}_k \quad (2.7)$$

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{t}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2.8)$$

(2.7) ir (2.8) lygčių parametrai tokie patys kaip ir (2.5) ir (2.6) lygtyse.

Principe UKF procesas yra analogiškas standartinio KF procesui. Išskyrus tai, kad prognozuojamai būsenai ir matavimo rezultatams bei atitinkamoms kovariacijų matricoms apskaičiuoti UKF naudoja sigma taškus ir netiesines lygtis. Matematinis UKF procesas pateiktas žemiau.

1. UKF pradiniais nustatymams naudojami $\mathbf{x}_0$ ir $\mathbf{P}_0$.

2. Apskaičiuoti prognozuotas būsenas $\mathbf{x}^-$ pagal:

2.1. Iš $\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}$ apskaičiuojami $2n$ sigma taškai

$$\mathbf{x}_{k-1}^{(i)} = \mathbf{x}_{k-1}^+ + \tilde{\mathbf{x}}^{(i)}, i = 1, \dots, 2n \quad (2.9)$$

Kur

$$\tilde{\mathbf{x}}^{(i)} = (\sqrt{n\mathbf{P}_{k-1}^+})_i^T, i = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}^{(n+i)} = -(\sqrt{n\mathbf{P}_{k-1}^+})_i^T, i = 1, \dots, n \quad (2.11)$$

n yra būsenų vektoriaus $\mathbf{x}_k$ elementų skaičius. $\sqrt{n\mathbf{P}}$ yra $n\mathbf{P}$ kvadratinė šaknis tokia, kad $(\sqrt{n\mathbf{P}})^T (\sqrt{n\mathbf{P}}) = n\mathbf{P}$. $(\sqrt{n\mathbf{P}})_i$ yra $\sqrt{n\mathbf{P}}$ i -toji eilutė.

2.2. $2n$ sigma taškų transformavimui iš (2.9) lygties naudojami sigma taškai $\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}$ ir netiesinio proceso lygtis:

$$\mathbf{x}_k^{(i)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, t_k) \quad (2.12)$$

2.3. Apskaičiuojamas prognozuojamas būsenos vektorius:

$$\mathbf{x}_k^- = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \mathbf{x}_k^{(i)} \quad (2.13)$$

2.3. Apskaičiuojama prognozuojama klaidos kovariacijų matrica:

$$\mathbf{P}_k^- = \frac{1}{2n} (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k^-) (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k^-)^T + \mathbf{Q}_k \quad (2.14)$$

3. Apskaičiuojami prognozuojami matavimų rezultatai ir susijusios kovariacijų matricos:

3.1. Matavimų rezultatų $2n$ sigma taškų radimui iš (2.12) panaudojamas $\mathbf{x}_k^{(i)}$:

$$\mathbf{z}_k^{(i)} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k^{(i)}, t_k) \quad (2.15)$$

3.2. Prognozuojamiems matavimams $\mathbf{z}_k^-$ apskaičiuoti iš (2.15) naudojamas $\mathbf{z}_k^{(i)}$:

$$\mathbf{z}_k^{(i)} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \mathbf{z}_k^{(i)} \quad (2.16)$$

3.3. Pagal $\mathbf{z}_k^{(i)}$ (2.15) ir $\mathbf{z}_k^-$ (2.16) apskaičiuojama matavimų prognozuojama klaidos kovariacijos matrica:

$$\mathbf{P}_z = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \left(\mathbf{z}_k^{(i)} - \mathbf{z}_k^- \right) \left(\mathbf{z}_k^{(i)} - \mathbf{z}_k^- \right)^T + \mathbf{R}_k \quad (2.17)$$

3.4. Apskaičiuojama matavimų prognozuojama klaidos kryžminė kovariacijų matrica:

$$\mathbf{P}_{xz} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \left(\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k^- \right) \left(\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k^- \right)^T \quad (2.18)$$

4. Kai galimi nauji matavimų duomenys, apskaičiuojamas būsenos įvertis $\mathbf{x}_k^+$

4.1. Apskaičiuojama Kalmano stiprinimo matrica:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xz} \mathbf{P}_z^{-1} \quad (2.19)$$

4.2. Apskaičiuojama įvertinta būsena $\mathbf{x}_k^+$:

$$\mathbf{x}_k^+ = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_k^-) \quad (2.20)$$

4.3. Apskaičiuojama įvertinimo klaidos kovariacijų matrica:

$$\mathbf{P}_k^+ = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_z \mathbf{K}_k^T \quad (2.21)$$

5. Kartojamas procesas nuo 2 etapo iki 5 etapo.

2.3. Klaidų tipai bei jų modeliavimas

Bendru atveju klaidos klasifikuojamos į jutiklio klaidas, įrenginio klaidas ir proceso klaidas (Isermann 2006; Blanke *et al* 2006; Ding 2008; Zhang *et al* 2008; Heredia ir Ollero 2009):

- Įrenginio klaidos – šios klaidos įvyksta, kai sistema pradeda nenormaliai veikti, o klaidų atsiradimo priežastimi gali būti mechaniniai įrenginio gedimai;
- Proceso klaidos – šios klaidos įvyksta, kai sistemoje pakeičiamas sąryšis tarp įėjimo ir išėjimo;
- Jutiklio klaidos – šios klaidos įvyksta sistemos išėjimo matavimų metu.

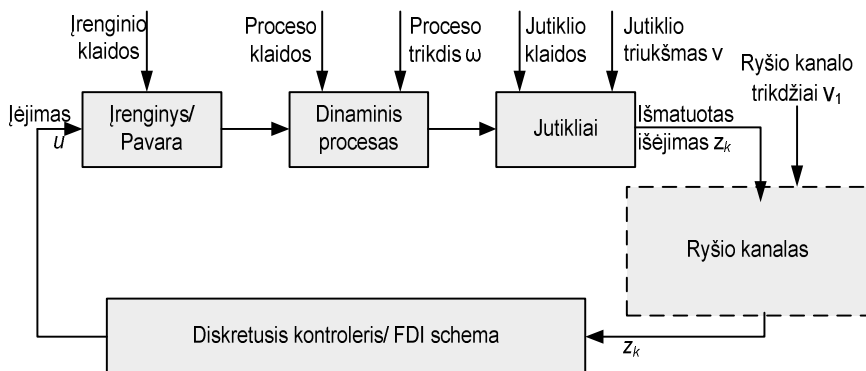
Detalizuokime jutiklio klaidas:

- Absoliuti jutiklio klaida. Tai yra katastrofinė klaida, kai jutiklis nustoja funkcionavęs ir išėjime duodamas nulinio lygio signalas. Ši klaida įvyksta dėl elektrinių ar ryšio sutrikimų.
- Pastovaus nuokrypio atsiradimas. Šis klaidos tipas išėjimo signalą tam tikrą laiką tarpą pakeičia konstantos dydžio nuokrypiu.

- Dreifas arba pridėtinio signalo klaidos tipas. Tai labai dažnas klaidos tipas pasitaikantis analoginiuose jutikliuose, kuris atsiranda dėl jutiklyje vykstančių temperatūrinių procesų ar kalibravimo netikslumų.
- Didinantis jutiklio klaidos tipas. Tai klaidos tipas, kai jutiklio nominalūs parodymai pakeičiami tam tikru atsitiktiniu masteliu.
- Išskirtinių duomenų jutiklio klaidos. Šios klaidos pasitaiko gana retai ir yra jutiklio (pvz. GPS įrenginio) matavimų serijos klaida atsirandanti dėl skaičiavimų algoritmo netikslumų.
- Proceso trikdys – įvykis keičiantis dinaminio proceso įėjimo ir išėjimo sąryšius;
- Jutiklio triukšmas – matavimo proceso metu matavimų rezultatą įtakovantis veiksnys bendru atveju tenkinanti Gauso baltojo triukšmo sąvoką;
- Ryšio kanalo trikdžiai – procesai įtakovantys matavimo rezultatų perdavimą diskrečiajam kontrolieriui.

Klaidų modeliavimui ir tyrimams sudarykime tinklinę autonominio orlaivio valdymo sistemą su įrenginiu, valdomu dinaminio procesu, jutikliais ir diskrečiuoju kontrolieriu (2.3 pav.).

Realiomis sąlygomis veikiančią dinaminę sistemą veikia išoriniai veiksniai – įrenginio klaidos, proceso klaidos, jutiklio klaidos ir atitinkami triukšmų ir trikdžių šaltiniai, taip pat neišvengiamas matavimų duomenų ir valdymo komandų perduodamų ryšio kanalais vėlinimas (2.3 pav.).



2.3 pav. Tinklinės valdymo sistemos modelis

Fig. 2.3. Structure of networked control system

Klaidų nustatymui ir identifikavimui modeliuoti 2.3 paveiksle pateiktai sistemai sudarykime sistemos klaidų modelį. Visų pirma aptarkime kokią sistemą analizuosime.

Išplėskime diskretaus laiko sistemos proceso ir matavimų lygtis ((2.5) ir (2.6) lygtys):

$$\mathbf{x}_{k+1} = (\Phi + \Delta\Phi)\mathbf{x}_k + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_1\boldsymbol{\omega}_k \quad (2.22)$$

$$\mathbf{z}_k = (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})\mathbf{x}_k + (\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D})\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_2\mathbf{v}_k \quad (2.23)$$

Čia: $\mathbf{u}_k$ yra įrenginio įėjimo vektorius.

Yra tariama, kad sistemos įėjimo vektorius $\mathbf{u}_k$ yra žinomas, bet sistemos modelis turi neapibrėžtumus $\Delta\Phi$, $\Delta\mathbf{B}$, $\Delta\mathbf{H}$ ir $\Delta\mathbf{D}$.

Taigi, sistemai (2.22 ir 2.23 lygtys) bendras klaidos modelis yra:

$$\mathbf{x}_{k+1} = (\Phi + \Delta\Phi + \Delta\Phi_c)\mathbf{x}_k + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}_c)\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_1\boldsymbol{\omega}_k + \mathbf{B}\mathbf{f}_{ak} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{z}_k = (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H}_c)\mathbf{x}_k + (\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D}_c)\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_2\mathbf{v}_k + \mathbf{f}_{sk} + \mathbf{f}_{rk} \quad (2.25)$$

Čia: $\mathbf{f}_{ak}$ yra pavaros klaidos; $\mathbf{f}_{sk}$ yra jutiklio klaidos; $\mathbf{f}_{rk}$ yra ryšio kanale atsiradusios sklaidos; $\Delta\Phi_c$, $\Delta\mathbf{B}_c$, $\Delta\mathbf{H}_c$ ir $\Delta\mathbf{D}_c$ yra komponentų klaidų vektoriai.

Vienas iš pagrindinių FDI metodų tikslų yra sugeneruoti tokias liekanas, kurios būtų nejautrios triukšmui, modelio neapibrėžtumui ir išoriniams trikdžiams (Inseok *et al* 2010). Tačiau tai yra nelengva užduotis. Daugelis FDI algoritmų, tokie kaip klasikinis nežinomo įėjimo stebėtojas ir pariteto sąryšio metodas projektuojami pridėtiniam triukšmui ir trikdžiams, su sąlyga, kad matricos $\mathbf{E}_1$ ir $\mathbf{E}_2$ yra žinomos. Paprastai yra sunku įvertinti komponentų ir modelio neapibrėžtumo klaidas daugybinėje formoje, taip kaip pateikta (2.24) ir (2.25) lygtyse. Vienas iš galimų sprendimų yra modelio neapibrėžtumus modeliuoti kaip pridėtinį trikdį su laike kintančia trikdžio būsena sistemos matrica. Analogiškai reikia keisti ir komponentų klaidas. Tuomet turėsime diskretaus laiko sistemos klaidos modelį:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_1\boldsymbol{\omega}_k + \mathbf{B}\mathbf{f}_{ak} + \mathbf{F}_{1k}\mathbf{f}_{ck} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_2\mathbf{v}_k + \mathbf{f}_{sk} + \mathbf{f}_{rk} + \mathbf{F}_{2k}\mathbf{f}_{ck} \quad (2.27)$$

Tariant, kad $\mathbf{n}_k = [\boldsymbol{\omega}_k, \mathbf{v}_k]^T$ yra triukšmo vektorius ir $\mathbf{f}_k = [\mathbf{f}_{ak}, \mathbf{f}_{sk}, \mathbf{f}_{ck}, \mathbf{f}_{rk}]^T$ yra klaidų vektorius. Šis būsenų erdvės modelis gali būti transformuojamas į įėjimo–išėjimo struktūrą:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{G}(\mathbf{z})\mathbf{u}_k + \mathbf{F}(\mathbf{z})\mathbf{f}_k + \mathbf{E}(\mathbf{z})\mathbf{n}_k \quad (2.28)$$

Kur

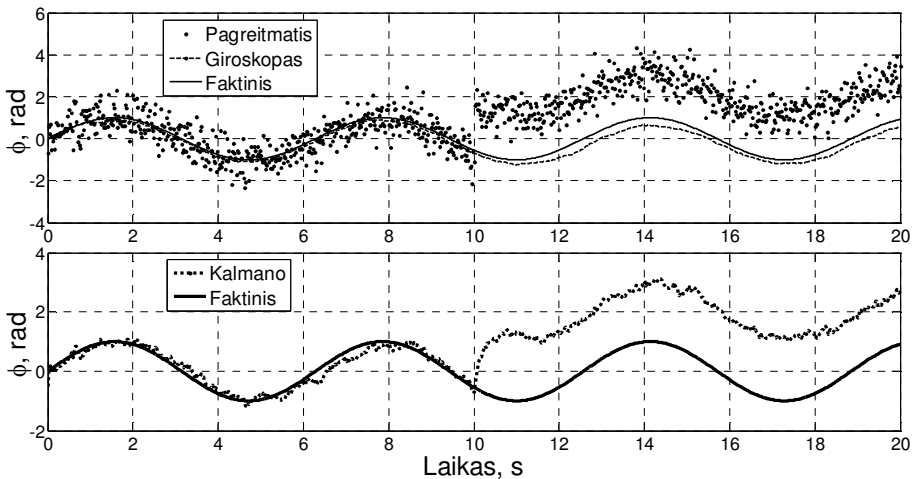
$$\mathbf{G}(\mathbf{z}) = \mathbf{H}(\mathbf{z}\mathbf{I} - \Phi)^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{z}) = [(\mathbf{z}\mathbf{I} - \Phi)^{-1}\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2]$$

$$E(z) = [(zI - \Phi)^{-1}]BI(zI - \Phi)^{-1}F_1 + F_2$$

Remdamiesi suformuotomis diskretaus laiko proceso (2.22) ir matavimų (2.23) lygtimis sumodeliuokime galimas tinklinės valdymo sistemos (2.3 pav.) klaidas. Modeliavimus atliksime programiniu paketu MATLAB. Modeliavimo programos kodas pateiktas priede A. Modeliavimams taikysime aukščiau aprašytą sistemą su tomis panašiomis charakteristikomis. Modeliuokime 20 sekundžių trukmės matavimo duomenų seką. Matavimų dažnis - 50 Hz (atitinka „Ardu Pilot“ autopiloto integruoto matavimų modulio matavimų dažnį). Polinkio kampo matavimų triukšmo kovariacijų matrica $R_{\text{kampo}} = 0.3$, kampo ir giroskopiinio jutiklio matavimo proceso kovariacijų matricos atitinkamai yra $Q_{\text{kampo}} = 0.05$ ir $Q_{\text{giroskopo}} = 0.5$. Matavimų signalus su modeliuojamomis klaidomis vertinkime Kalmano filtru.

Vienas iš galimų klaidų sistemoje, yra jutiklio matavimų rezultatų mastelio pakeitimas visam matavimų laikui. Sumodeliuokime 20 sekundžių trukmės matavimo duomenų seką, kurioje nuo 10 sekundės pagreitmačio matavimo duomenys pakeisti pastoviu dydžiu (2.4 pav.).

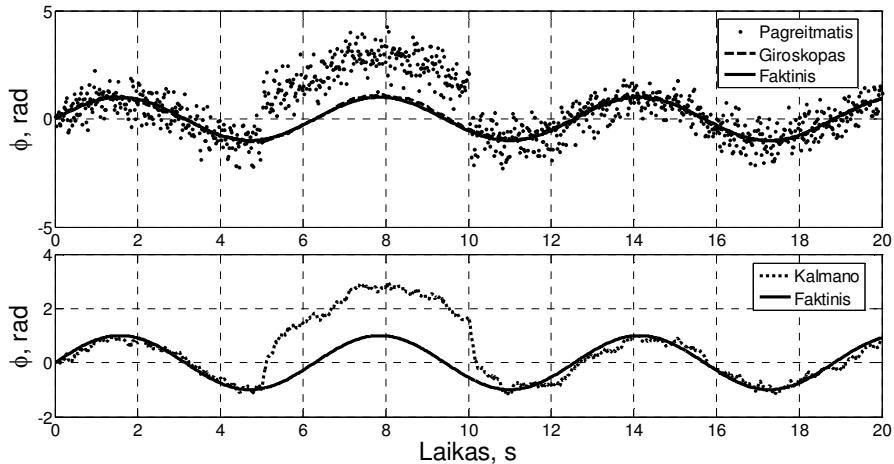


2.4 pav. Polinkio kampo su pagreitmačio mastelio klaida modeliavimas (viršuje) ir matavimo duomenų apdorojimas Kalmano filtru (apačioje)

Fig. 2.4. Modeling of angle of bank with an accelerometer scale error (above) and processing of measurement data with Kalman filter (below)

Iš atliktos matavimo sekos modeliavimo ir vertinimo KF matyti, kad Kalmano filtras atliko tik matavimo duomenų suliejimą ir triukšmo sumažinimą. Pastoviu dydžiu pakeisto pagreitmačio signalo neatstatė į pradinę būseną. Toks matavimų duomenų iškraipymas orlaiviui gali turėti katastrofiškų padarinių.

Analogiškai modeliuokime jutiklio trikdžius ir matavimų sekos vertinimą esant pastovaus nuokrypio klaidai (2.5 pav.) ir matavimų duomenų praradimą ryšio kanale, kai prarandami abiejų jutiklių duomenys (2.6 pav.).

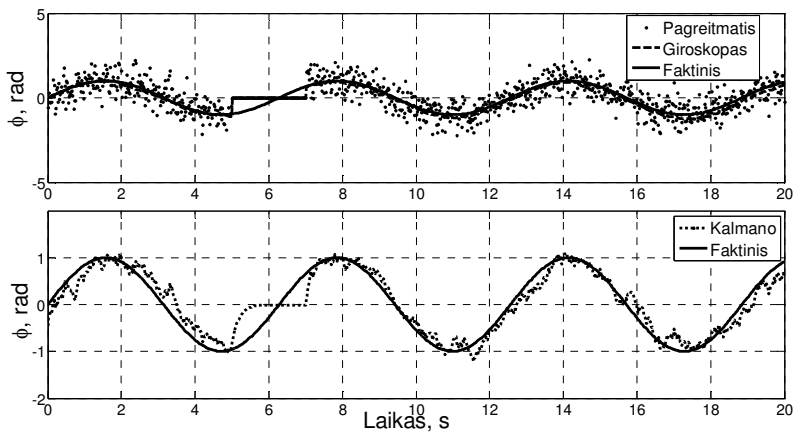


2.5 pav. Polinkio kampo su pagreitmačio pastovaus nuokrypio klaida modeliavimas (viršuje) ir matavimo duomenų apdorojimas Kalmano filtru (apačioje)

Fig. 2.5. Modeling of angle of bank with an accelerometer constant deviation error (above) and processing of measurement data with Kalman filter (below)

Iš atliktos matavimo sekos modeliavimo ir vertinimo KF matyti, kad Kalmano filtras tik atliko matavimo duomenų suliejimą ir triukšmo sumažinimą, tačiau pagreitmačio matavimų duomenų pakeitimo (nuo 5 iki 10 sekundės) neaptiko signalo neatstatė į pradinę būseną.

Analogiškai modeliuokime ryšio kanalo sutrikdymą, kuomet prarandame abiejų jutiklių matavimų informaciją (2.6 pav.). Ryšio kanalo sutrikdymas modeliuojamas nuo 5 iki 7 sekundės.



2.6 pav. Polinkio kampo su pagreitmačio ir giroskopo matavimų duomenų praradimo ryšio kanale modeliavimas (viršuje) ir matavimo duomenų apdorojimas Kalmano filtru (apačioje)

Fig. 2.6. Modeling of angle of bank with an accelerometer and gyroscope measurement data loss in the communication channel (above) and processing of measurement data with Kalman filter (below)

Matavimo duomenis apdorojus Kalmano filtru matome, kad ryšio kanalo sutrikdymo metu KF negali atkurti prarastų duomenų.

Aptartus matavimų duomenų iškraipymo ar praradimo atvejus galima laikyti klaidomis, kurios turi įtakos orlaivio valdymo sistemos veikimui ir paties orlaivio saugai. Aptartas matavimų duomenų suliejimo metodas nėra tinkama priemonė matavimų informacijai išsaugoti.

Norint išvengti nepageidautinų padarinių, normaliam orlaivio sistemų veikimui, reikia minėtas klaidas identifikuoti ir kiek galima efektyviau izoliuoti nuo tolimesnės įtakos sistemai. Šiam tikslui pasiekti reikia taikyti klaidų nustatymo, identifikavimo ir izoliavimo metodus.

Sistemoje atsiradusių klaidų nustatymui ir identifikavimui gali būti taikomi keli metodai, kurie skirstomi į kelias pagrindines grupes (Inseok *et al* 2010):

- Pilnos būsenos stebėtojų paremti metodai;
- Nežinomo signalo jėgimo metodai;
- Lygiavertiškumo sąsajų metodai;
- Optimizavimu paremti metodai;
- Kalmano filtru paremti metodai;
- Stochastiniai metodai;
- Sistemos identifikavimo metodai;
- Netiesiniai sistemų metodai;

- Diskretaus įvykio sistemų/hibridinių sistemų metodai;
- Dirbtinio intelekto metodai.

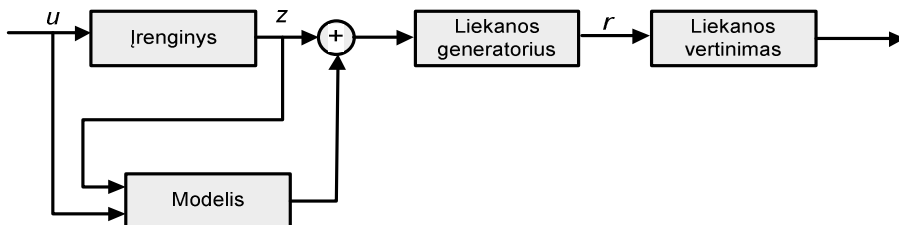
Toliau detalizuokime kaip atliekamas klaidų nustatymas taikant liekanos signalo analizę.

2.2. Liekanos generavimo metodai

Praktikoje taikoma keletas skirtingų klaidos nustatymo ir identifikavimo filtravimo schemų. Dažniausiai pasitaikanti FDI schema paremta liekanos generavimu ir jos analize.

Liekanos generavimui reikalingas vienoks ar kitos sistemos dubliavimas. Yra du sistemos dubliavimo tipai – fizinis dubliavimas ir analitinis dubliavimas. Tradiciniuose taikymuose klaidos nustatymas buvo paremtas aparatinio arba fizinio dubliavimo metodo taikymu, kur naudojami papildomi jutikliai, pavaros ir kiti matavimų komponentai konkrečių kintamųjų matavimams. Fizinis aparatinės įrangos dubliavimo metodas taikomas dideliuose orlaiviuose, kur papildoma įranga sąlyginai turi mažą įtaką bendrai orlaivio masei ir užimamai vietai. Kalbant apie mažus orlaivius, ypač apie UAV, su aparatinės įrangos dubliavimu iškyla nemažai problemų – papildomas vietos užėmimas, bendros masės padidėjimas ir panašiai, todėl šiuose orlaiviuose dažniausiai taikomas analitinis dubliavimas.

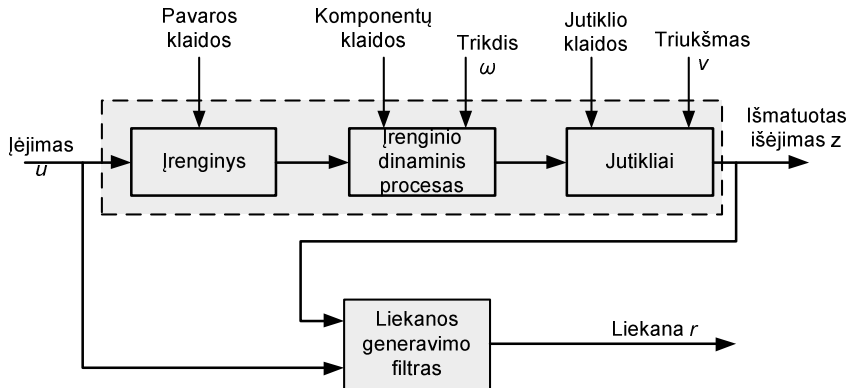
Analitiniam dubliavimui nereikalinga papildoma aparatinė įranga, tačiau reikalingos žinios apie sistemą, kurioje dubliavimas neatsiejamai apima sistemos statinius ir dinامينius procesus, įėjimo ir išėjimo sąryšius. Klasikine klaidos nustatymo ir identifikavimo filtro schema galima laikyti modeliu paremta FDI schema su liekanos generatoriumi ir liekanos analizės algoritmais (2.7 pav.).



2.7 pav. Modeliu paremto klaidos nustatymo schema

Fig. 2.7. Scheme for the model based fault detection

Liekanos signalas paprastai generuojamas iš prognozuojamo matavimų sistemos išėjimo signalo ir išmatuoto signalo skirtumo arba iš sistemos įėjimo ir išėjimo signalų analizės (Inseok *et al* 2010) (2.8 pav.).



2.8 pav. Klaidos modelis naudojamas liekanos generavimo filtro sudarymui (Inseok *et al* 2010)

Fig. 2.8. Fault model used for designing the residual generation filter (Inseok *et al* 2010)

Daugelis FDI sistemų paremti 2.8 paveiksle pateiktu klaidos modeliu. Toliau detalizuokime kaip minėtas klaidos modelis pritaikomas FDI sistemai.

Kaip 2.8 paveiksle pateiktoje schemoje liekanos signalo generavimas paremtas įėjimo ir išėjimo vektorių funkcija:

$$\mathbf{r}_k = g(\mathbf{u}_k, \mathbf{z}_k) \quad (2.29)$$

Bendru atveju liekana yra skirtumas tarp matavimų išėjimo signalo $\mathbf{z}_k$ ir įvertintų matavimų signalo $\hat{\mathbf{z}}_k$.

Klaidų nustatymui liekana turi tenkinti sekančias savybes:

- Nekintantis sąryšis – kai sistemoje nėra klaidų, liekanos vidurkis yra $E[r_k] = 0$;
- Klaidos nustatomumas – kai sistemoje įvyksta klaida $E[r_k] \neq 0$;

Praktinėse sistemose, liekanos yra iškraipomos triukšmo, nežinomų trikdžių ir sistemos modelio neapibrėžtumų. Vadinasi, daugelio FDI metodų tikslas yra stiprių liekanos signalų, nejautrių triukšmui ir neapibrėžtumams, generavimas.

Kadangi Kalmano filtrai plačiai taikomi sistemos būsenos vertinimui, tai tuos pačius metodus paanalizuokime ir FDI sistemose.

2.3 Kalmano filtravimo metodo taikymas FDI sistemose

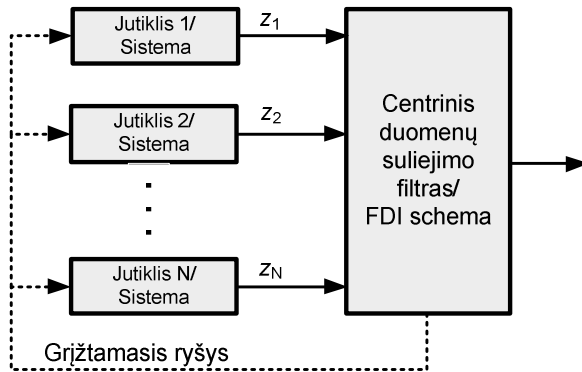
Kalmano filtro metodas gali būti laikomas specialiu stochastinio optimizavimo naudojant tiesinės kvadratinės optimizacijos techniką atvejį. Mehra ir Peschon (Mehra ir Peschon 1971) laikomi pirmaisiais pasiūliusiais pagrindines procedūras FDI taikymuose, kur liekanos (kitaip dar inovacijų) generavimui pritaikytas Kalmano filtras. Klaidos nustatomos liekanos „baltumo“, vidurkio ir kovariacijos statistiniais testais. KF liekanų analizei taikomi bendrieji statistiniai testai – didžiausio tikėtinumo metodas, apibendrintas tikimybinis santykis (GRV – Generalized Likelihood Ratio).

Nepriklausomos liekanos skaičiuojamos atskirai kiekvienam jutiklio klaidos tipui. Kaip buvo minėta anksčiau, liekanos turi būti taip sugeneruojamos, kad jos jautrios tik konkrečiam klaidos tipui. Bendrai liekana R_k yra skirtumo kvadrato tarp realaus jutiklio matavimo $\mathbf{z}_k$ ir jo įvertčio $\mathbf{z}_k^+$ funkcija:

$$\mathbf{R}_k = \sum_{i=1}^n m_i (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_i^+)^2 \quad (2.30)$$

Čia m_i yra svorio koeficientas kuris remiantis sukaupta patirtimi ir žiniomis aprašomas kiekvienam klaidos tipui atskirai.

Gera žinoma KF metodai yra daugelio modelių adaptyvaus vertinimo metodai (MMAE – Multiple Model Adopt Estimation) (Ducard *et al* 2006; Hanlon ir Maybeck 2000; Hide *et al* 2003). MMAE metode, sistemos dinaminiai procesai yra aprašyti stochastiniu tiesinės sistemos modeliu su neapibrėžtais parametrais (kurie ir laikomi klaidomis) įtrauktais į būsenos matricas. Šiuo atveju yra laikoma, kad neapibrėžtumas gali įgauti tik baigtinės sekos diskrečias reikšmes. KF FDI sistemoje suprojektuotas kaip filtras duodantis atsaką į kiekvieno parametro reikšmę. MMAE plačiai pritaikomas aviacijoje FDI problemoms spręsti orlaivio valdymo sistemose, inercinės navigacijos įrenginiuose (Hide *et al* 2003; Ding 2008) ir kt. Kalmano filtro liekanų charakteristikos pristatytos Hanlon ir Maybeck (Hanlon ir Maybeck 2000) ir liekanos panaudotos pavarų ir jutiklių klaidų orlaivio valdymo sistemose nustatymui. Viena žymi šio metodo savybių ta, kad yra baigtinis klaidų tipų skaičius, o valdymo kontroleris specialiai projektuojamas kiekvienam klaidos tipui. Iš kitos pusės, daugelyje sisteminių taikymų, reikia apibrėžti didelį kiekį skirtingų klaidų tipų, o tai savo ruožtu stipriai padidina skaičiavimo pajėgumų poreikį. MMAE modelis iš esmės aprašo centralizuotą Kalmano filtro pritaikymą FDI sistemoje (2.9 pav.).

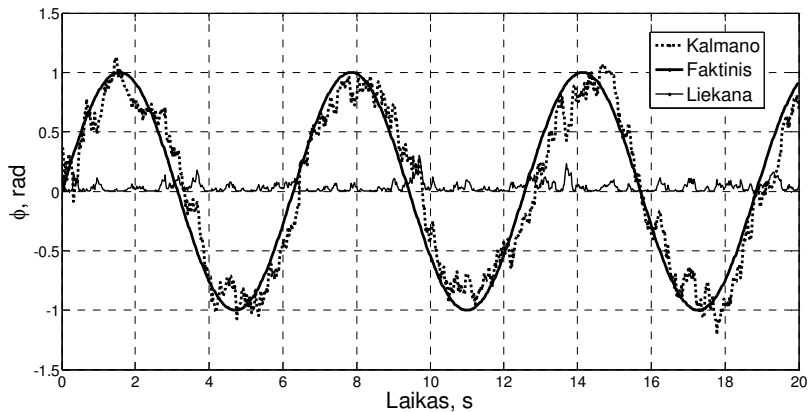


2.9 pav. FDI schema su centralizuotu Kalmano filtru

Fig. 2.9. FDI scheme with centralised Kalman filter

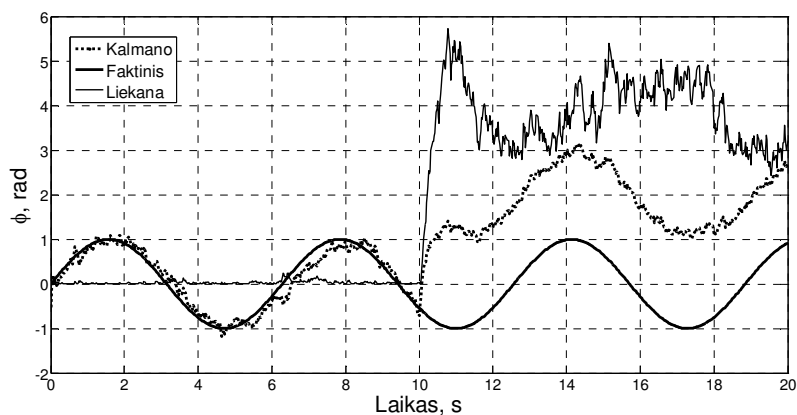
Centralizuotos FDI schemas atveju Kalmano filtras panaudotas kaip sistemos stebėtojas, pagal matavimų rezultatus vertinantis sistemos būseną, o FDI schemeje atliekamas jutiklių klaidų nustatymas. Centralizuotoje FDI sistemoje liekana gali būti generuojama pagal (2.30) lygtį.

Remdamiesi (2.30) lygtimi sugeneruokime klaidos liekanos signalus 2.3.skyriuje modeliuojamiems klaidų tipams (2.10 – 2.13 pav.).



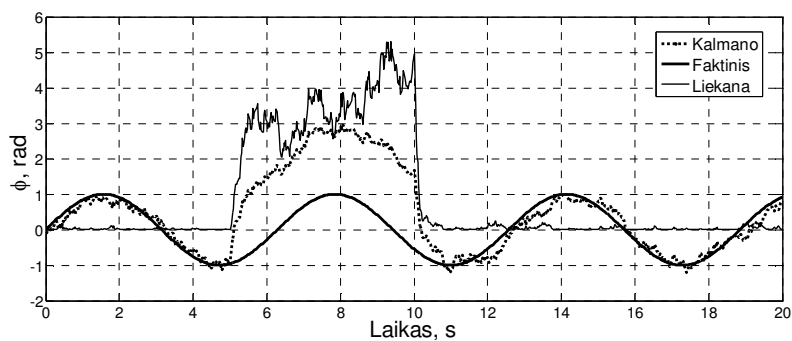
2.10 pav. Liekanos signalas po duomenų suliejimo Kalmano filtru operacijos

Fig. 2.10. Residual signal after data fusion with Kalman filter



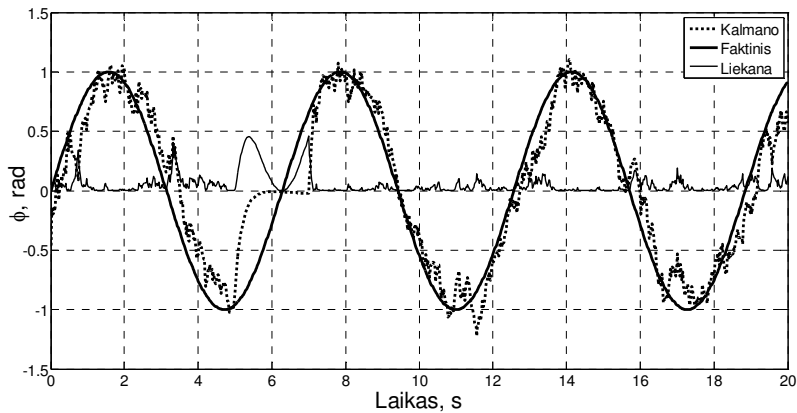
2.11 pav. Liekanos signalas esant pagreitmačio mastelio klaidai po duomenų suliejimo Kalmano filtru

Fig. 2.11. Residual signal with an accelerometer scale error after data fusion with Kalman filter



2.12 pav. Liekanos signalas esant pagreitmačio pastovaus nuokrypio klaidai po duomenų suliejimo Kalmano filtru

Fig. 2.12. Residual signal with an accelerometer constant deviation error after data fusion with Kalman filter



2.13 pav. Liekanos signalas esant duomenų praradimo klaidai po duomenų suliejimo Kalmano filtru

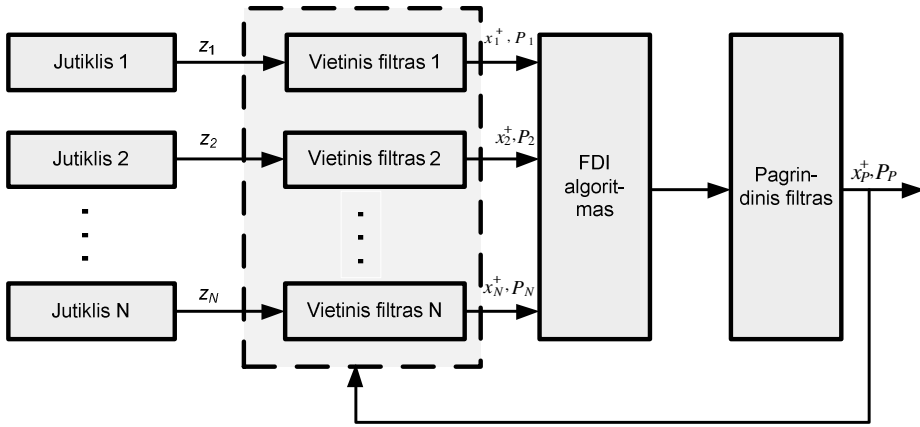
Fig. 2.13. Residual signal with data loss error after data fusion with Kalman filter

Iš sugeneruotų liekanos signalų matome, kad kiekvieno tipo klaida sukuria tam tikrą signalą. Analizuojant šiuos liekanos signalus galima identifikuoti klaidos tipą.

Centralizuota FDI schema efektyvi esant nedideliam jutiklių skaičiui. Didinant jutiklių skaičių, stipriai padidėja KF apkrovimas, reikalingi didesni skaičiavimų pajėgumai, o rezultatas tampa mažiau patikimas.

Wei ir Schwarz pristatė decentralizuotą Kalmano filtro (DKF – Decentralized Kalman Filter) strategiją, ją pritaikant GPS/INS integracijai (Wei ir Schwarz 1990). Edelmayer ir Miranda pasiūlė centralizuoto išplėstinio Kalmano filtro (DeKF – Decentralized Extended Kalman Filter) taikymą klaidoms atsparioms sistemoms (Edelmayer ir Miranda 2007). Orlaivio integruotoje navigacijos sistemoje siūloma taikyti decentralizuotą UKF jungtinėje formoje, taip suliejant inercinės navigacijos, GPS, Doplerio radaro ir kitus duomenis.

Decentralizuotos schemas privalumas tas, kad vienu metu galima prijungti žymiai daugiau jutiklių neprarandant bendro sistemos stabilumo, nes vietiniai filtrai veikia lygiagrečiai. Taip pat decentralizuotoje sistemoje lengviau nustatomos jutiklių, įrenginių ar ryšio kanalo klaidos ir jos lengviau izoliuojamos nuo sistemos (2.14 pav.).



2.14 pav. Jungtinio filtro struktūrinė schema
Fig. 2.14. The structure of the federated filter

Decentralizuotoje FDI sistemoje vietiniai filtras gali būti sudaryti pagal skirtingas filtravimo metodus – KF, EKF, UKF ar kitus. Lokalūs matavimų įverčiai perduodami pagrindiniam filtrui, kuris sistemai pateikia globalų įvertį. Pagrindinio filtro veikimo dažnis toks pat kaip ir lokalių filtrų. Jei lokalių filtrų įverčiai yra nekoleriuoti, tai globalus įvertis gali būti apskaičiuojamas pagal lygtis:

$$\mathbf{x}_P^+ = \mathbf{P}_P \{ \mathbf{P}_1^{-1} \mathbf{x}_1^+ + \mathbf{P}_2^{-1} \mathbf{x}_2^+ + \dots + \mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{x}_N^+ \} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{P}_P^{-1} = \mathbf{P}_1^{-1} + \mathbf{P}_2^{-1} + \dots + \mathbf{P}_N^{-1} \quad (2.32)$$

Čia $\mathbf{x}_i^+$ ir $\mathbf{P}_i$ yra vietinio i -tojo filtro įvertis ir kovariacija, o $\mathbf{P}_P^{-1}$ vadinamas informacijos matrica (Bae ir Kim 2010). Globalus įvertis yra vietinių įverčių sumos su atitinkama svorių matrica $\mathbf{P}_i^{-1} (i = 1, 2, \dots, N)$ ir $\mathbf{P}_i^{-1}$ kombinacija.

Jungtinė filtro struktūra esant normaliam sistemos veikimui duoda tikslesnius būsenos įverčius. Vis dėlto, jei sistemoje atsiranda klaidų, jungtinė filtro struktūra sutrinka. Šios problemos sprendimui taikomas jungtinės formos FDI algoritmas.

Klaidų nustatymas dažniausiai reikalauja atidaus matavimo duomenų stebėjimo. Bendru atveju matavimų duomenys turi žinomą tikimybės pasiskirstymo funkciją apribotą atsitiktinio trikdžio ir matavimų triukšmo. Įvykus klaidai ar sistemą paveikus išoriniu trikdžiu, matavimų duomenys pakeičia savo statistines charakteristikas. Klaidų nustatymo algoritmas ir stebi šiuos matavimų duomenų statistinių savybių pasikeitimus (Bae ir Kim 2010).

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Atlikus FDI metodų literatūros apžvalgą, nustatyta, kad dažniausiai taikomos centralizuotos, decentralizuotos ir jungtinės FDI schemas.
2. Sudarytas tiriamo orlaivio matavimų informacinės sistemos klaidų modelis.
3. Sistemoje atsirandančių klaidų įtakai orlaivio matavimų informacijos vientisumui ir patikimumui pažeisti, buvo atliktas keletas klaidų modeliavimas, o klaidinga matavimų informacija apdorota centralizuotoje FDI schemoje.
4. Nustatyta, kad centralizuota FDI schema tinkama sistemai su nedideliu jutiklių skaičiumi. Esant dideliame jutiklių skaičiui, reikšmingai didėja filtro apkrovimas, kas gali iššaukti filtro nestabilumą ir nepatikimų rezultatų išdavimą.
5. Nustatyta, kad matavimų informacijos saugos užtikrinimui tikslinga taikyti jungtinę FDI schemą.

Matavimų informacijos saugos metodikos sudarymas ir modeliavimas

Kaip matyti iš antrame skyriuje pateiktos medžiagos, orlaivio informacinę sistemą veikia įvairaus tipo triukšmai ir trikdžiai, kurių poveikį matavimų rezultatams galime traktuoti kaip atitinkamas klaidas. Tokių klaidų įtaka orlaivio stabilumui ir valdumui gali turėti neigiamos įtakos ar sąlygoti katastrofinius padarinius.

Šiame skyriuje pateikiamas matavimų informacijos saugos metodikos sudarymas ir modeliavimas.

Sudaryta matavimų informacijos saugos metodika paremta matavimų informacijos apdorojimo metodų pritaikymu matavimų informacijos saugai.

Skyriaus tematika publikuota straipsniuose Rudinskas 2009a) ir Rudinskas 2009b)

3.1. Nepilotuojamo orlaivio matavimų informacinės sistemos tyrimas

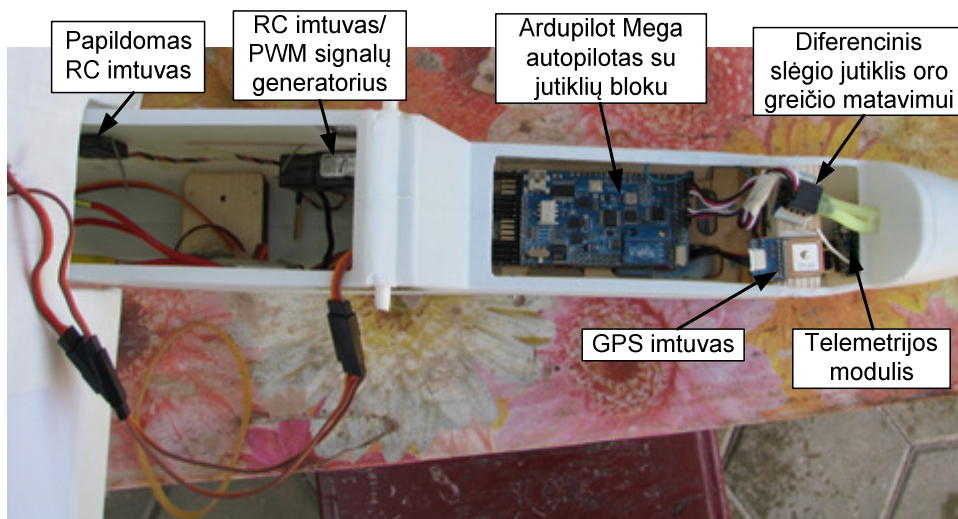
Atliekami tyrimai orientuoti į mažąją aviaciją, ypač į nepilotuojamus orlaivius. Todėl pirma aptarkime nepilotuojamą orlaivį kaip matavimų informacinę sistemą.

Tyrimams pasirinktas nedidelis (iki 2 kg keliamosios masės) lėktuvo modelis „Sky Arrow“ kodiniu pavadinimu „AGAI 02“ (3.1 pav.). Šį modelį aprūpino visa nepilotuojamam skrydžiui reikalinga įranga (3.2 pav.): autopilotas, jutiklių modulis, telemetrijos modulis, rankinio valdymo modulis, GPS imtuvas.



3.1 pav. Nepilotuojamo orlaivio AGAI 02 bendras vaizdas iš priekio, viršaus ir šono

Fig. 3.1. General view of unmanned aircraft AGAI 02: front, top and side



3.2 pav. Nepilotuojamo orlaivio „AGAI 02“ valdymo ir kontrolės įrangos išdėstymas

Fig. 3.2. Operation and control equipment deployment of UAV „AGAI 02“

Nepilotuojamo orlaivio automatiniam valdymui buvo pasirinkta atvirojo kodo autopilotas – „Ardu Pilot Mega“. Atvirojo kodo sistema pasirinkta dėl kelių priežasčių:

- Tiek programinis kodas, tiek aparatinė įranga pakankamai gerai dokumentuota;
- Prie sistemos dirba daug šios srities profesionalų ir entuziastų;
- Taikomos populiarios programavimo kalbos ir laisvai prienami programavimo įrankiai;
- Laisvai prieinamos visos kodo dalys, nėra patentuotų ar mokamų kodo elementų, todėl galima laisvai keisti bet kuriuos sistemos parametrus;
- Nedidelės įrangos kainos;

Žemės valdymo centrą sudaro kompiuteris su programine įranga ir rankinio valdymo pultas. Kompiuterio programinė įranga „APM Planner“ (3.3 pav.) taip pat yra atviro kodo programinė įranga. Nepilotuojamo orlaivio valdymo sistemos struktūrinė schema ir įrangos aprašymas pateiktas priede B.



3.3 pav. „APM Planner“ programos langas

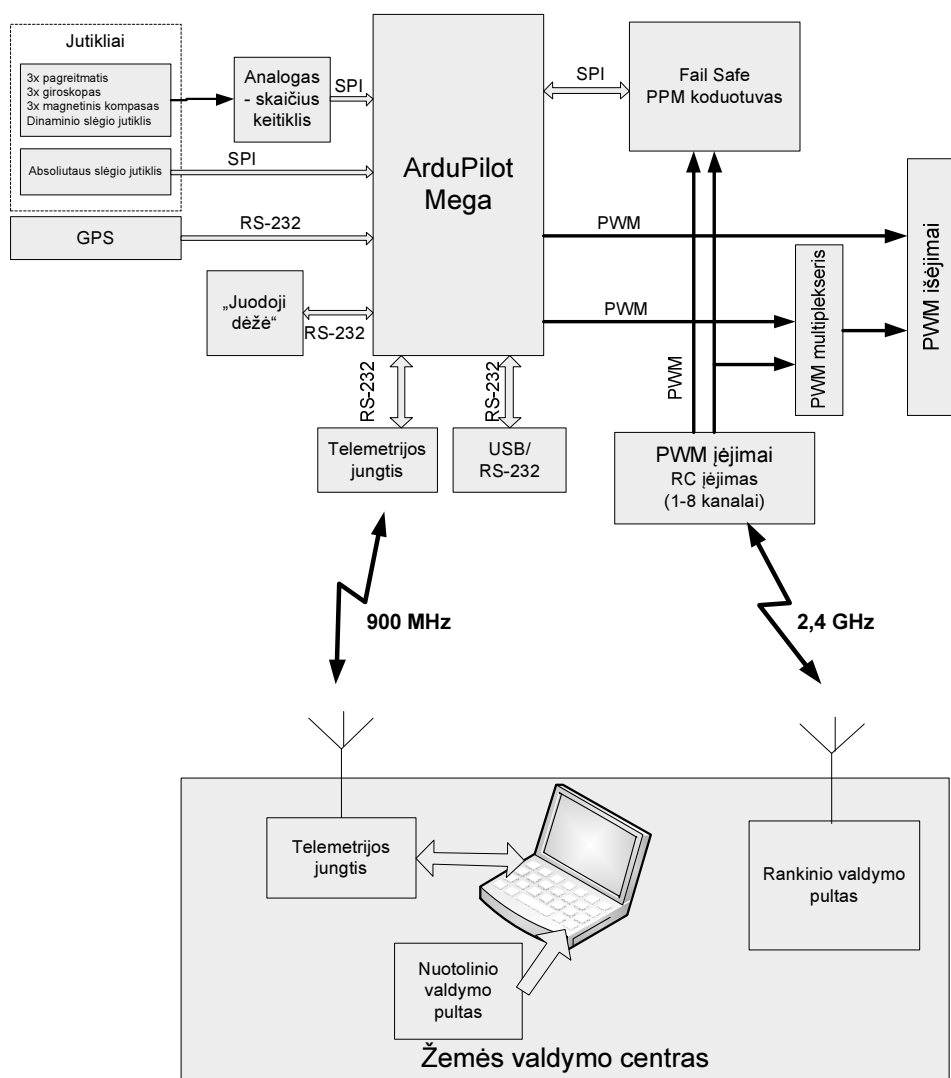
Fig. 3.3. „APM Planner“ program

Detaliau paanalizuokime nepilotuojamo orlaivio MIS informacijos saugos požiūriu (3.4 pav.).

Tokio orlaivio matavimų informacinę sistemą sudaro:

- Jutiklių blokas;
- Skrydžių valdymo programinė įranga;
- Sąsajos moduliai:
 - Nuotolinio valdymo ir telemetrijos duomenų perdavimo modulis,
 - Nuotolinio rankinio valdymo imtuvas,
 - Laidinė sąsaja su kompiuteriu (USB jungtis).

Orlaivio informacinėje sistemoje naudojamos paprastos nuosekliosios duomenų perdavimo sąsajos (SPI, RS-232) bei impulso pločiu moduluoti plokštumų ir traukos valdymo įrenginių valdymo signalai. Visi šie duomenų perdavimo metodai neturi jokių saugos nuo išorinio trikdžio mechanizmų. Taip pat naudojama telemetrijos ir rankinio valdymo sistemos neturi informacijos šifravimo schemų. Todėl tokiai sistemai reikia imtis papildomų matavimų informacijos saugos priemonių.



3.4 pav. Nepilotuojamo orlaivio informacinės sistemos struktūrinė schema

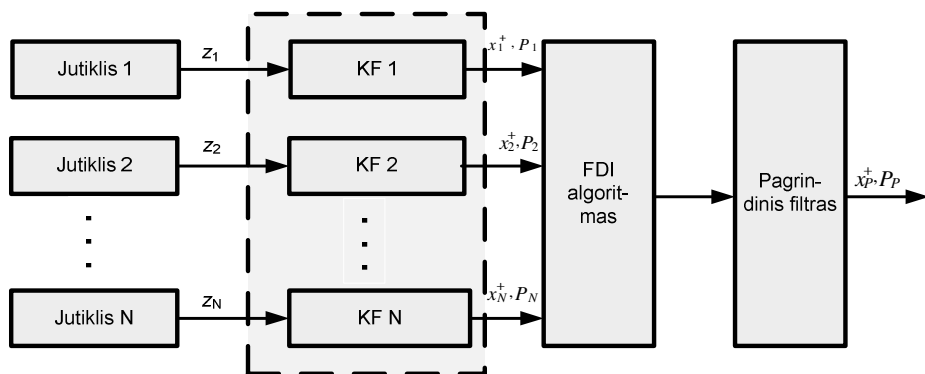
Fig. 3.4 Flowchart of unmanned aircraft operation system

Siekiant apsaugoti bepiločio orlaivio informacinę sistemą, nuo antrame skyriuje pateiktų klaidų tipų, sudarykime matavimų informacijos saugos metodiką.

3.2. Matavimų informacijos saugos metodikos sudarymas ir modeliavimas

Remdamiesi 1 ir 2 skyrių medžiaga sudarykime orlaivio integruotos diagnostikos sistemos matavimų informacijos saugos mechanizmą. Tam tikslui išnaudojime jau esamas integruotos diagnostikos priemones: sudarytus sistemos proceso modelius ir matavimų lygtis. Matavimų informacijos saugos mechanizmo idėja yra ta, kad jau esamus FDI metodus pritaikyti matavimų informacijos saugumui įtakos turinčių klaidų nustatymui ir identifikavimui. Kitaip tariant šios uždavinio sprendimas suvedamas į specializuoto filtro, jautraus tam tikram klaidų tipui, projektavimą.

Remdamiesi 2 skyriuje padaryta išvada, matavimų informacijos saugai projektuosime jungtinės konfigūracijos filtrą. Kiekvienos jutiklio matavimų duomenis filtruosime taikydami Kalmano filtrą (lokalusis filtras). Kiekvieno jutiklio įverčius ir apdorosime klaidų nustatymo ir identifikavimo algoritmu. Atlikę klaidų nustatymo ir identifikavimo procedūrą, tinkamus matavimų duomenis perduosime pagrindiniam filtrui. Po šio etapo orlaivio valdymo kontrolieriui bus perduodamas apibendrintas atliktų skrydžio parametro matavimų įvertis. Projektuojamo filtro schema pateikta 3.5 paveiksle.



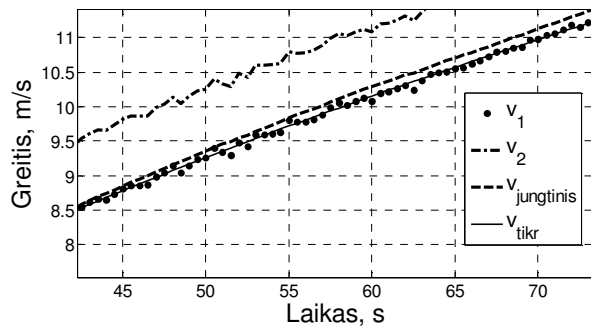
3.5 pav. Matavimų informacijos saugą užtikrinančio filtro schema

Fig. 3.5. Scheme of measurement information safety ensuring filter

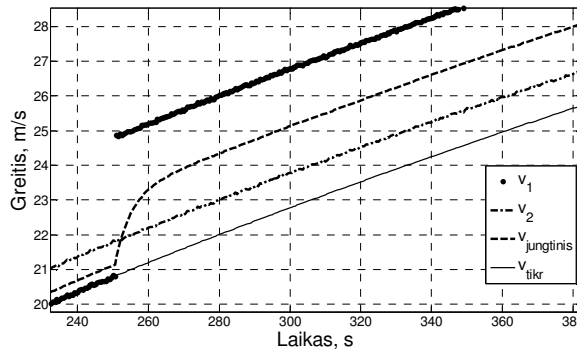
Projektuojamoje filtro schemoje lokalūs matavimų duomenų įverčiai randami taikant klasikinę Kalmano filtravimo schemą (2.1 pav.), o pagrindinis

duomenų suliejimas atliekamas pagal (2.31) ir (2.32) lygtis. Toks filtras vadinamas jungtiniu Kalmano filtru (JKF – Federated Kalman Filter).

Sistemos modeliavimui pasirinkime orlaivio greičio matavimus. Orlaivio greitį matuosime dviem nepriklausomais jutikliais v_1 ir v_2 . Pastarieji jutikliai gali būti to paties tipo (esant sistemos dubliavimo atvejui) arba skirtingų tipų jutikliai iš kurių matavimų rezultatų galime gauti stebimą parametą (pvz.: oro greičio indikatorius, GPS, INS). Atlikime 2.3 skyriuje pateiktų klaidų tipų modeliavimą orlaivio greičio matavimo sistemoje. Modeliuojamus jutiklių matavimų duomenis, nepriklausomai nuo klaidos tipo, suliekiame pagrindiniame filtre. Tai yra neatlikime klaidų nustatymo ir identifikavimo procedūrų (3.6–3.10 pav.).

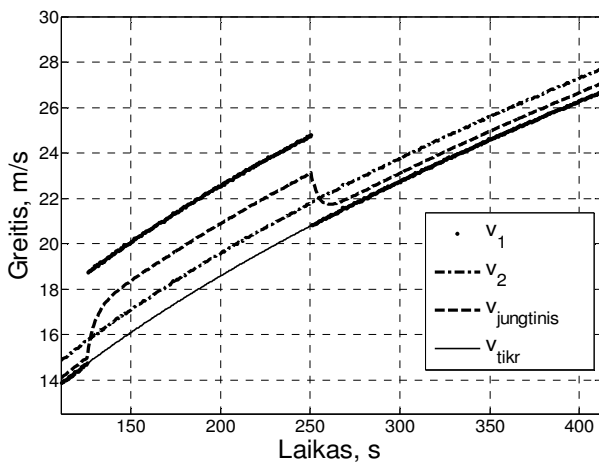


3.6 pav. Orlaivio greičio matavimų rezultatai kai sistemoje nėra klaidų
Fig. 3.6. Aircraft speed measurement results without errors in the system



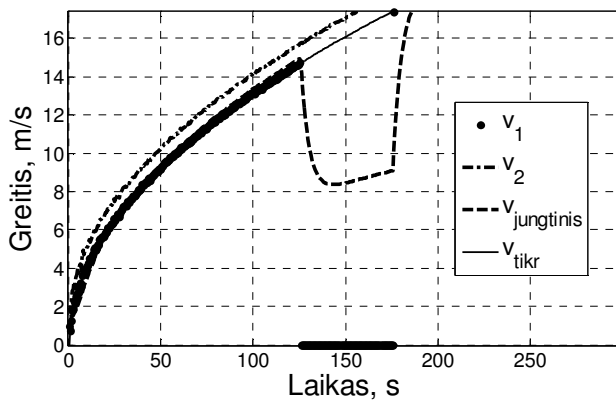
3.7 pav. Orlaivio greičio matavimai su vieno jutiklio mastelio klaida modeliavimas

Fig. 3.7. Modeling of aircraft speed measurements with one sensor scale error



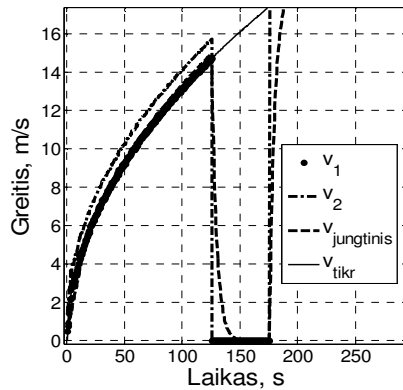
3.8 pav. Orlaivio greičio matavimai su vieno jutiklio pastovaus nuokrypio klaida

Fig. 3.8. Modeling of aircraft speed measurements with one sensor constant deviation error



3.9 pav. Orlaivio greičio matavimai su vieno jutiklio matavimų duomenų praradimu ryšio kanale modeliavimas

Fig. 3.9. Modeling of aircraft speed measurements with one sensor data loss in the communication channel

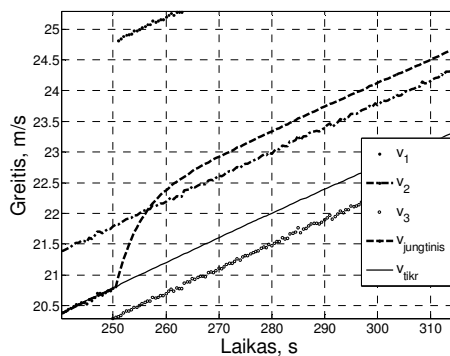


3.10 pav. Orlaivio greičio matavimai su dviejų jutiklių matavimų duomenų praradimu ryšio kanale modeliavimas

Fig. 3.10. Modeling of aircraft speed measurements with data loss of two sensors in the communication channel

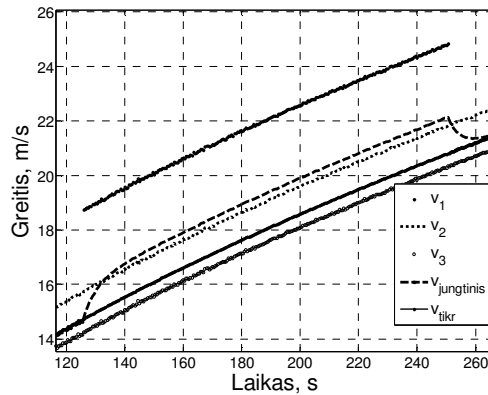
Iš atliktų modeliavimo rezultatų matyti, kad jungtinė filtro schema atlieka proporcinį matavimo duomenų suliejimą, taip dalinai išsaugant matuojamą parametą – orlaivio greitį. Esant visų jutiklių matavimų duomenų praradimui, jungtinio filtro išėjime taip pat prarasime matavimų duomenis.

Analogišką modeliavimą atlikime trijų nepriklausomų jutiklių orlaivio greičio matavimo sistemoje esant vieno jutiklio mastelio, vieno jutiklio pastovaus nuokrypio ir vieno jutiklio matavimų duomenų praradimu ryšio kanale (3.11–3.13 pav.).



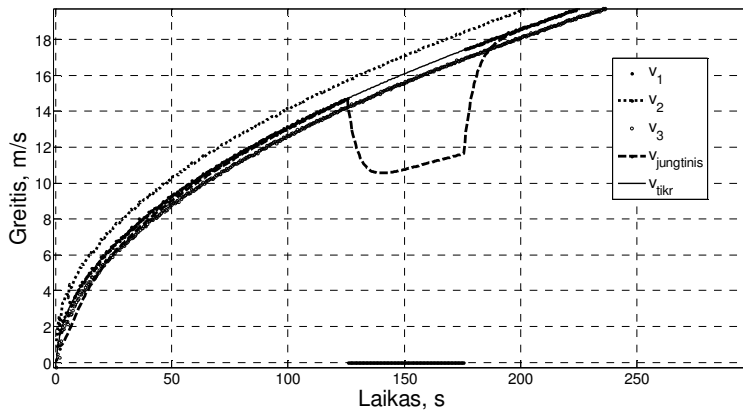
3.11 pav. Orlaivio greičio matavimai trijų jutiklių sistemoje su vieno jutiklio mastelio klaida modeliavimas

Fig. 3.11. Modeling of aircraft speed measurements with a three sensor system with one sensor scale error



3.12 pav. Orlaivio greičio matavimai trijų jutiklių sistemoje su vieno jutiklio pastovaus nuokrypio klaida

Fig. 3.12. Modeling of aircraft speed measurements with a three sensor system with one sensor constant deviation error



3.13 pav. Orlaivio greičio matavimai trijų jutiklių sistemoje su vieno jutiklio matavimų duomenų praradimu ryšio kanale modeliavimas

Fig. 3.13. Modeling of aircraft speed measurements with a three sensor system with data loss of one sensor in the communication channel

Iš atlikto modeliavimo matyti, kad matavimams naudojant daugiau negu dviejų jutiklių matavimų duomenis, jungtinio filtro realizacija duoda tikslesnius matavimų įverčius. Toks matavimų duomenų apdorojimo būdas matavimų informacijos išsaugojimo prasme gali būti taikomas nekritinėse orlaivio sistemose,

arba sistemose, kurių skaičiavimų pajėgumai labai riboti. Pastarosioms sistemoms, esamus matavimų duomenų filtrus modifikavus į jungtinio filtro schemą pasiekiami pakankamai geri matavimų informacijos saugos rodikliai.

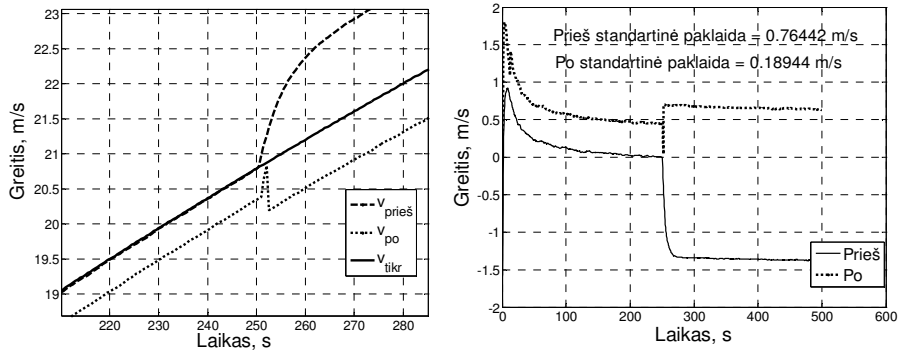
Tokio matavimų suliejimo taikymo ne visada pakanka. Norint išvengti klaidingų matavimų duomenų įtakos JKF, reikia prieš atliekant matavimų duomenų suliejimo procedūrą atlikti klaidingų matavimų duomenų šaltinio nustatymą. Šiai procedūrai atlikti JKF reikia įdiegti klaidų nustatymo ir identifikavimo schemą.

Jungtinėje filtro schemoje, FDI algoritmas stebi matavimų informacijos liekanos poveikį jautrumo veiksniai. Minėtas jautrumo veiksnys gali būti pritaikytas klaidų nustatymui. Jautrumo veiksnį galima užrašyti sekančia lygtimi:

$$S_i = (x_i^+ - x_p^+)^T (P_i + P_p)^{-1} (x_i^+ - x_p^+) \quad (2.33)$$

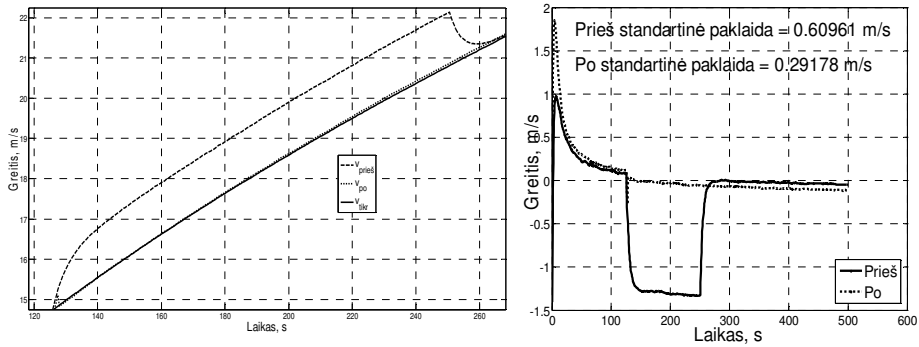
Kai S_i yra mažesnis už slenksčio funkcijos ribinę reikšmę, tuomet i -tasis jutiklis laikomas nesugedusiu, todėl jutiklio išėjimas gali būti panaudojamas globalaus įverčio x_p^+ ir P_p apskaičiavimui. Jei S_i yra didesnis už slenksčio funkcijos ribinę reikšmę, tai laikoma, kad sistemoje įvyko klaida ir i -tojo jutiklio matavimų rezultatus reikia pašalinti iš globalaus įverčio x_p^+ ir P_p skaičiavimų.

Atlikime trijų jutiklių matavimų duomenų apdorojimo JKF su klaidų nustatymo ir izoliavimo funkcija modeliavimą. Modeliuokime anksčiau aptartus klaidų atvejus papildomai įvedant ketvirtą klaidą – dviejų jutiklių matavimų duomenų praradimas. Klaidingo jutiklio klaidos izoliavimo funkcijos efektyvumą įvertinkime skaičiuodami jungtinio signalo prieš klaidos izoliavimą ir po jo standartinį nuokrypį. Modeliavimo rezultatai pateikti 3.14–3.17 paveiksluose.



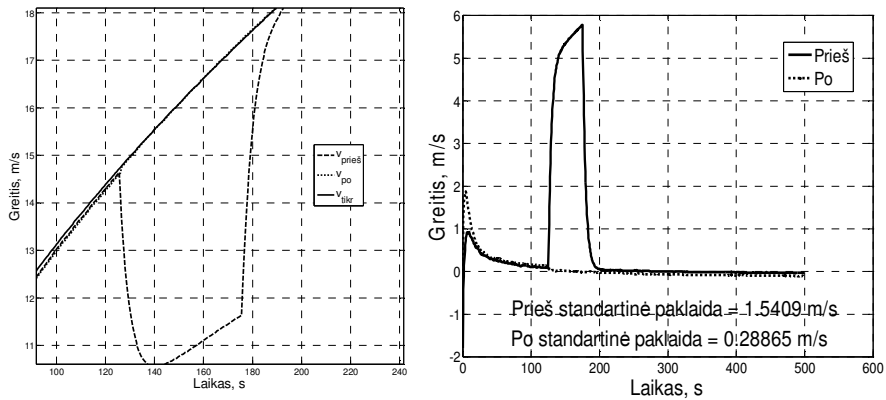
3.14 pav. Matavimų su jutiklio mastelio klaida rezultatai prieš klaidingo jutiklio izoliavimą ir po jo (kairėje) ir standartinio nuokrypio skaičiavimai (dešinėje)

Fig. 3.14. Results of measurements with sensor scale error before and after the isolation of the faulty sensor (left) and standard deviation calculation (right)



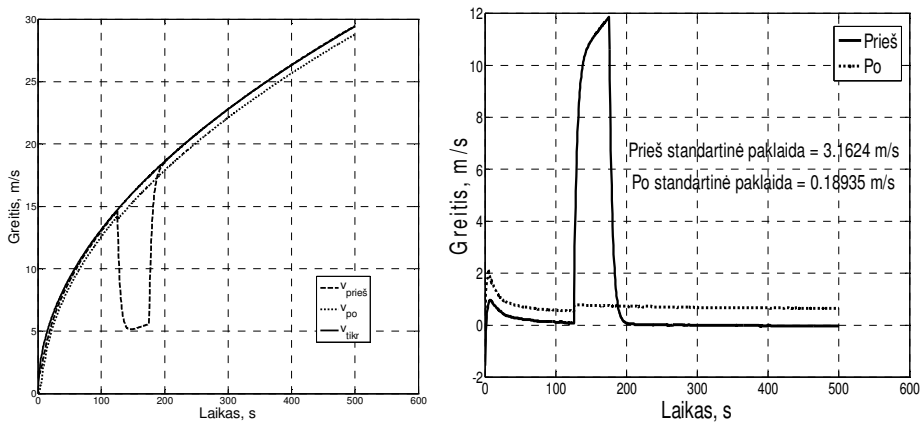
3.15 pav. Matavimų su jutiklio su pastovaus nuokrypio klaida rezultatai prieš klaidingo jutiklio izoliavimą ir po jo (kairėje) ir standartinio nuokrypio skaičiavimai (dešinėje)

Fig. 3.15. Results of measurements with constant deviation error before and after the isolation of the faulty sensor and standard deviation calculation (right)



3.16 pav. Matavimų su vieno jutiklio duomenų praradimu rezultatai prieš klaidingo jutiklio izoliavimą ir po jo (kairėje) ir standartinio nuokrypio skaičiavimai (dešinėje)

Fig. 3.16. Results of measurements with one sensor data loss before and after the isolation of the faulty sensor and standard deviation calculation (right)



3.17 pav. Matavimų su dviejų jutiklių duomenų praradimu rezultatai prieš klaidingo jutiklio izoliavimą ir po jo (kairėje) ir standartinio nuokrypio skaičiavimai (dešinėje)

Fig. 3.17. Results of measurements with data loss of two sensors before and after the isolation of the faulty sensor and standard deviation calculation (right)

Atliktų modeliavimų standartinio nuokrypio suvestinė pateikta 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Filto efektyvumo modeliavimo suvestinė

Table 3.1. Summary of filter efficiency modelling

Klaidos tipas	Standartinis nuokrypis prieš klaidos izoliavimą, m/s	Standartinis nuokrypis po klaidos izoliavimo, m/s
Sistema be klaidų	0,181	0,181
Jutiklis mastelio klaida	0,764	0,189
Jutiklis su pastovaus nuokrypio klaida	0,610	0,292
Vieno jutiklio duomenų praradimas	1,541	0,288
Dviejų jutiklių duomenų praradimas	3,162	0,189

Iš pateiktų modeliavimo rezultatų matyti, klaidų atsiradimas matavimų informacinėje sistemoje turi didelę įtaką bendrom signalo charakteristikom. Anali-

zuojant klaidos įtakos filtro išėjime standartinį nuokrypį, matome, kad klaidos įtaka atitinkamai klaidos tipui yra nuo 0,609 m/s iki 3,161 m/s. Jutikliai su klaidingais matavimų rezultatais pagrindiniame duomenų suliejimo filtre nevertinami tol kol klaidingo jutiklio matavimų duomenys neatsistatys į normalią būseną. Klaidų nustatymo ir izoliavimo procedūros efektyvumas yra atitinkamam klaidos tipui nuo 210 % iki 1681 %, o atstatyto signalo paklaidos standartinis nuokrypis palyginus su sistema neveikiama triukšmo yra 3,7–37 %. Tai yra atstatoma 63–96,7 % prarastų matavimų duomenų.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje ištirta pasirinkto bepiločio orlaivio informacinė sistema.

1. Ištyrus OIS, nustatyta, kad sistemoje informacija perduodama sąsajomis, kurios neturi informacijos saugos funkcijų. Iš sistemos aparatinės realizacijos matyti, kad fizinių informacijos saugos priemonių diegimas yra komplikotas. Norint į tiriamą įrangą įdiegti aparatinės informacijos saugos priemones, reikia iš principo pakeisti OIS aparatūros išpildymą.
2. Esamoje OIS matavimų informacijos saugai pasiūlytas informacijos saugos metodas paremtas rekursiniu Kalmano filtro pagrindu. Tokį sistemos papildymą lėmė tai, kad Kalmano filtravimo procesas leidžia ne tik iš matuojamų signalų šalinti matavimų triukšmą, bet pritaikius klaidų nustatymo ir identifikavimo mechanizmus sėkmingai nustatyti sistemoje atsirandančias klaidas ar įvykusius sistemos komponentų gedimus.
3. Pasiūlyta MIS matavimų informacijos saugos metodika. Šios metodikos esmė yra orlaivio daugelio jutiklių matavimų informacijos suliejimas, taip išsaugant pasirinktus bepiločio orlaivio skrydžio parametrus. MIS duomenų suliejimui pasirinktas jungtinės architektūros matavimų informacijos apdorojimo filtras.
4. Atliktas skrydžio parametrų matavimų duomenų perdavimo saugos metodikos modeliavimas parodė, kad sudaryta filtro schema sėkmingai identifikuoja sistemoje atsiradusius jutiklių sutrikimu, bet ir su matavimų duomenų perdavimu susijusius trikdžius, o atstatomas signalo tikslumas yra nuo 63 % iki 96,7 %.

Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų analizė

Šiame skyriuje pateikiamas OIDS matavimų informacijos saugos metodų taikymo eksperimentinis tyrimas. Eksperimentams atlikti pasirenkamos kelios technologijos – „Fly by Wire“ ir „Fly by Wireless“. Pastaroji orlaivio valdymo ir duomenų perdavimo tarp orlaivio sistemų koncepcija yra ganėtinai nauja ir yra intensyvių tyrimų stadijoje.

Matavimų informacijos apdorojimo algoritmas ištirtas praktiškai atliekant realius skrydžius. Eksperimentai atlikti realių skrydžių metu matuojant orlaivio parametrus – orlaivio oro greitį ir padėtį erdvėje. Šiuos skrydžio parametro matavimus atlikome dviem skirtingais orlaiviais su skirtinga technine įranga:

1. Suprojektuotas bevielių jutiklių tinkas integruotas į sklandytuvo LAK-20T oro greičio matavimo sistemą.
2. Radijo bangomis valdomą lėktuvo modelį aprūpintą nepilotuojamą skrydį užtikrinančia įranga (bepilotis lėktuvas)

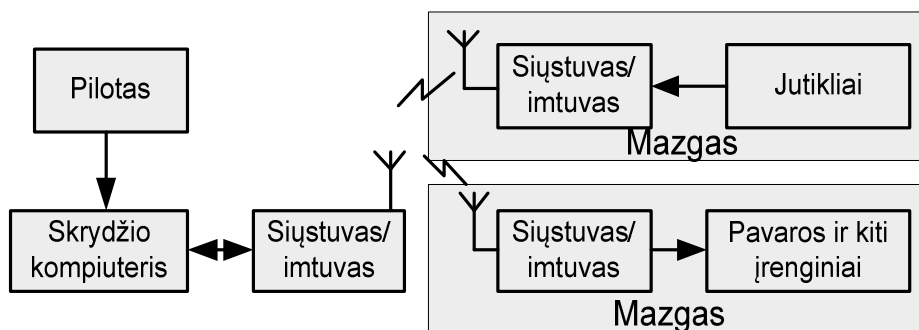
Šio skyriaus medžiaga aprobuota Respublikinėje konferencijoje „Aviacija 2011“ ir publikuota žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ (Stankūnas *et al* 2011).

4.1. Bevielių jutiklių tinklo projektavimas

Viena iš šiuolaikinių orlaivio valdymo koncepcijų yra tinklinė valdymo sistema, kur kiekvienas orlaivio funkcinis elementas yra tarsi atskira informacinio tinklo dalis – tinklo mazgas. Kaip žinome informaciniuose tinkluose taikomos kelios skirtingos duomenų perdavimo technologijos – variniai kabeliai, optiniai kabeliai ir bevielės technologijos. Savo darbe kaip orlaivio MIS matavimų duomenų perdavimo terpę parinktą bevielę technologiją, dar kitaip žinoma kaip „Fly – by – Wireless“. Toliau analizuokime šią technologiją ir jos pagrindu suprojektuosime orlaivio IMS ir ją ištirsime eksperimentiškai.

4.1.1. Fly-by-Wireless koncepcija

Tradiciškai orlaivio MIS sudaryta iš vieno sudėtingo centralizuoto duomenis apdorojančio įrenginio su vienu ar daugeliu procesorių, kur matavimo prietaisai ir valdantys įrenginiai sujungti laidais. Tai yra nepatogu, nes visi sistemos tarpusavyje jungiami naudojant mechanines jungtis. Vienas iš inovatyvių sprendimų leidžiančių atsisakyti mechaninių jungčių tarp apdorojimo įrenginio ir kitų paskirstytos architektūros sistemos įrenginių taikant bevielės technologijas (4.1 pav.).



4.1 pav. „Fly-by-Wireless“ koncepcija

Fig. 4.1. Fly-by-Wireless” concept

Naudojamas metodas vadinamas „Fly-by-Wireless“ (Coelho *et al* 2006). „Fly-by-Wireless“ koncepcija paremta sąsajų tarp instrumentų ir apdorojimo įrenginių realizacija taikant IEEE 802.15.x specifikacijas. Tuo pačiu metu tradicinis sudėtingas duomenų apdorojimo blokas pakeičiamas keletu mažiau sudėtingų apdorojimo įrenginių (mazgais) išdėstytais visame orlaivyje. Mazgai išdės-

tomi arčiau jutiklių ir kontroliuojamų plokštumų, o tarp mazgų sukuriamas bevielis tinklas.

Toks sistemos realizavimo būdas leidžia atsakyti didelio kiekio jungiamųjų laidų, o tai sumažina bendrąją orlaivio masę. Matavimų ir valdymo komandų perdavimas bevieliu būdu reikalauja specialių informacijos saugos priemonių (Rudinskas ir Stankūnas 2009; Rudinskas ir kt. 2009), kurios reikalautų minimalių energijos sąnaudų (Toldinas ir kt. 2010).

4.1.2. Ryšių technologijos parinkimas

Bevielių jutiklių tinklų projektavimui naudojamos skirtingos ryšių technologijos. Radijo ryšio technologijos pasirinkimą lemia keli faktoriai. Pirmas – reikalinga perduodamos informacijos sparta ir ryšiui palaikyti reikalingas energijos kiekis. Kiti veiksniai nulemiantys technologijos pasirinkimą yra veikimo dažnis, protokolo savybės, prijungiamų įtaisų kiekis, ryšio modulių pasirinkimas, taip pat programinis aprūpinimas.

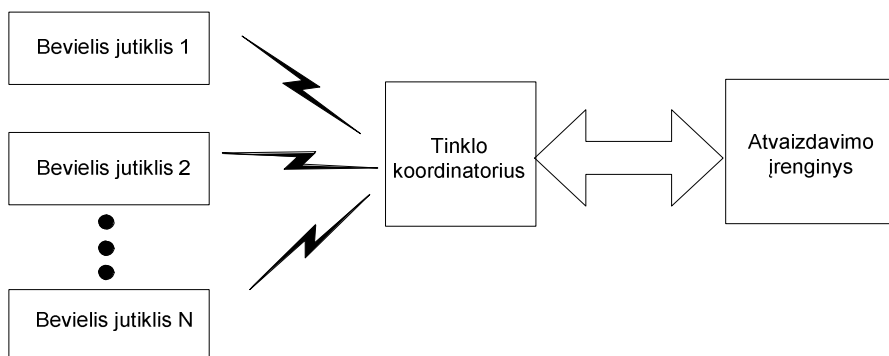
Projektuojamai MIS buvo analizuojamos kelios šiuo metu rinkoje prieinami bevielio ryšio pramonėi, mokslui ir medicinai (ISM – Industrial, Scientific and Medical) dažnių ruože veikiantys technologiniai sprendimai: IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee) ir IEEE 802.11 (WLAN) technologijos.

Apžvelgus aukščiau minėtas technologijas, pasirinkta ZigBee technologija leidžia kurti didelės apimties bevielius tinklus, nedidelės energijos sąnaudos, pakankama duomenų perdavimo sparta siekia 250 kbps ir nesudėtingas duomenų perdavimo protokolai.

ZigBee standartas yra optimizuotas žemos kainos, mažo energijos poreikio, automatikos, duomenų surinkimo ar valdymo sistemoms. ZigBee naudojamas tiesinės sekos spektro sklidimo (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum) moduliacija susietims), žvaigždės ir taškas – taškas tipo tinklams. Nominalus ryšio nuotolis apie 10 m., tiesioginio matavimo sąlygomis – 400 m. ir daugiau. ZigBee naudojamas 64 bitų IEEE adresas ir trumpas 16 bitų adresas skirtas vietiniam adresavimui, leidžia į tinklą sujungti tūkstančius galinių įrenginių.

4.1.2. Matavimų informacinės sistemos bandymai

Eksperimentiniam tyrimui atlikti buvo suprojektuota orlaivio bevielė MIS (Stankūnas ir Rudinskas 2010). MIS realizacijai pasirinkta ISM dažnių ruožas (2,4 GHz) ir IEEE 802.15.4 (Zigbee) protokolas, perduodamų duomenų sparta – 250 kbps, o veikimo atstumas – iki 400 m. (4.1 lentelė). Pasirinkta žvaigždės tipo tinklo jungimo schema (4.2 pav.) naudojamoje schemoje prie vieno tinklo koordinatoriaus galima prijungti iki 15 galinių mazgų.



4.2 pav. Matavimų informacinė sistema

Fig. 4.2. Informational system of measurements

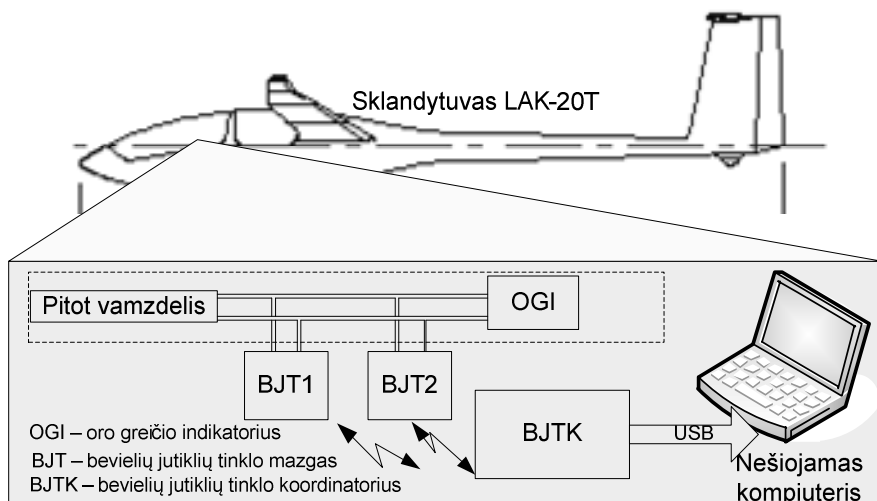
4.1 lentelė. Beveilių technologijų apžvalga

Table 4.1. Survey of wireless technologies

Pavadinimas	Veikimo nuotolis	Tinklo jungimo schema	Duomenų perdavimo sparta (kbps)	Sunaudojama galia	Dažnių ruožas (MHz)	Baterijos gyvavimo laikas
Bluetooth	1-100 m	Adhoc, taškas–taškas, žvaigždė	24000	100 mW	2400	Dienos, metai
WLAN	300 m	Mišrus, adhoc, žvaigždė	11000	100 mW	2400	Dienos
ZigBee	Iki 400 m	mišrus, adhoc, žvaigždė	250	30 mW	2400, 868, 915	6 mėn. – 2 metai.

Suprojektuotą MIS tikslinga išbandyti orlaivyje su minimaliu elektroninės įrangos kiekiu sukeliančiu elektromagnetinius trikdžius, ir gali turėti įtakos eksperimentinių matavimų tikslumui. Šiam tikslui pasiekti geriausiai tinka sklandytuvas. Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo pasirinktas sklandytuvas LAK-20T. Sklandytuve sumontuotas minimalus elektroninės įrangos kiekis: GPS imtuvas ir radijo ryšio stotelė. Skrydžio parametrai (greitis, aukštis, vertikalus greitis) matuojami mechaniniais prietaisais. Eksperimentams pasirenkame sklandytuvo greičio matavimus. MIS yra sumontuota orlaivio greičio matavimo

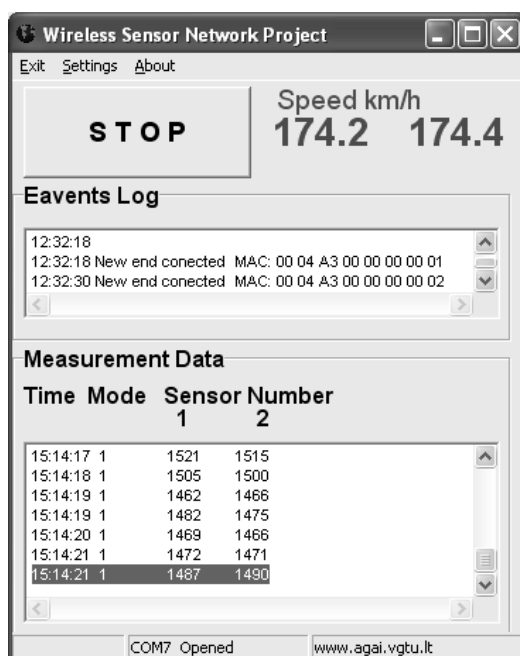
sistemoje (4.3. pav.). Orlaivio greičio matavimo sistemą sudaro Pitot vamzdelis, orlaivio greičio indikatorius, du bevieliai jutikliai, bevielių jutiklių tinklo koordinatorius ir nešiojamas kompiuteris su specialia programine įranga (4.4 pav.). Kadangi aviacijoje didelis dėmesys skiriamas saugai, tai greičio matavimo sistemos patikimumui padidinti naudojami du greičio jutikliai.



4.3 pav. MIS komponentų išdėstymas orlaivyje
Fig. 4.3. Deployment of MIS components in aircraft

Matuojamas orlaivio maksimalus greitis skridimo greitis iki 300 km/h, todėl buvo panaudotas matavimų dažnumas 2 Hz. Matavimai atliekami sinchroniškai, tai yra tinklo koordinatoriui išsiuntus sinchronizacijos signalą, pradedami matavimai. Neapdorotus matavimų rezultatus galiniai mazgai nuosekliai perduoda tinklo koordinatoriui. Iš tinklo koordinatoriaus duomenys perduodami programinei įrangai (4.2 pav.).

Matavimų informacinė sistema sudaryta iš trijų dalių (4.2 pav.) – bevielių jutiklių (BJ) bloko, bevielių jutiklių tinklo koordinatoriaus (BJTK) ir duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginio (DSAI) – nešiojamo kompiuterio su duomenų kaupimo ir apdorojimo programine įranga..



4.4 pav. Programos WISNEP langas

Fig. 4.4. WISNEP program window

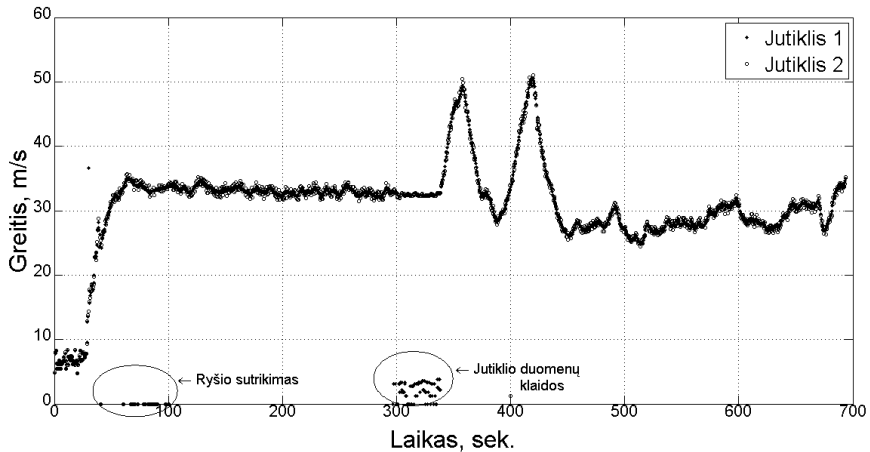
Eksperimento metu buvo atlikti keli laisvieji skrydžiai, o matavimų rezultatai kaupiami kompiuterio atmintyje tolimesniam apdorojimui. Duomenys kaupiami tik elektroninių jutiklių, todėl neįmanoma objektyviai palyginti sukauptus duomenis su mechaninio greičio indikatorius momentiniais parodymais.

4.2. Eksperimentų planavimas, matavimų sistemos eksperimentinis tyrimas ir duomenų analizė

Sistemoje atsirandančių klaidų analizei, neapdorotus matavimų duomenis surinkime atlikę eksperimentus dviejų tipų orlaiviais – sklandytuvu LAK-20T su įmontuota bevieline greičio matavimo sistema (4.1 poskyris) (Stankūnas *et al* 2011) ir nepilotuojamu orlaiviu „AGAI 02“ (3.1 poskyris). Abiem atvejais matavimų duomenys surenkami ir apdorojami kompiuteriu su atitinkama programine įranga.

Atlikę kelis skrydžius sklandytuvu (tyrimų schema pateikta 4.3 paveiksle) išskyrėme vieno skrydžio duomenis, kur matyti matavimų proceso metu atsiradę

trikdžiai – jutiklių triukšmas ir duomenų perdavimo metu atsiradęs duomenų praradimas (4.5 pav.).



4.5 pav. Sklandytuvu LAK-20T skrydžio metu surinkti greičio matavimo duomenys

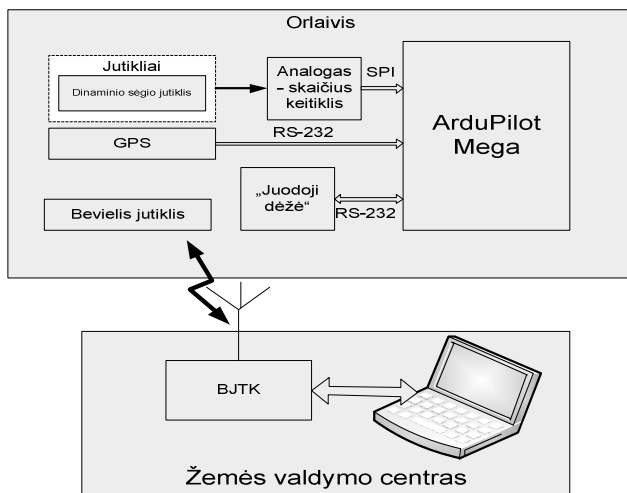
Fig. 4.5. Speed measurement data collected during glider LAK-20T flight

Nuo 50 iki 100 sekundės stebimas abiejų jutiklių matavimų duomenų praradimas, kuris sąlygotas ryšio sutrikimu. Nuo 300 iki 350 sekundės stebimas pirmo jutiklio matavimų duomenų klaidos, kurių atsiradimo priežastys gali būti kelios:

- Temperatūros įtaka;
- Maitinimo šaltinio įtampos šuolis;
- Kliūtis pneumatinėje sistemoje, neleidusi netrukdomai orui tekėti orlaivio pneumo sistemoje.

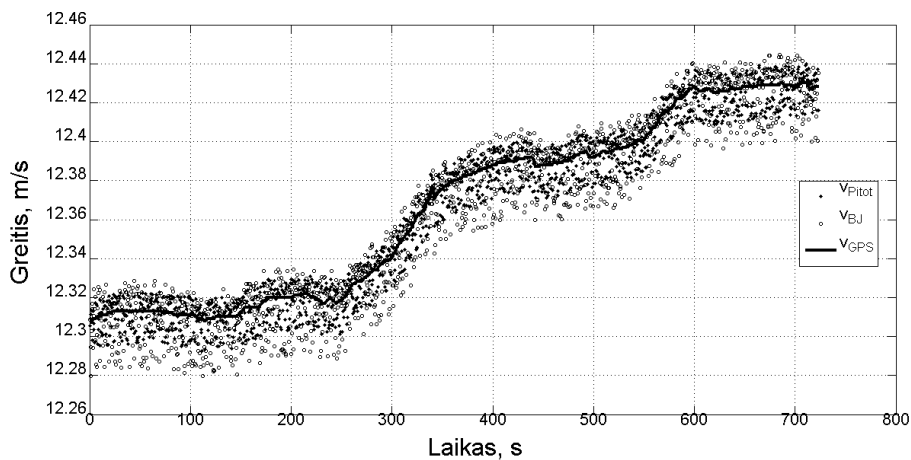
Toks matavimų duomenų praradimas gali turėti neigiamų padarinių orlaivio valdymui autonominiame režime.

Analogiškus skrydžio parametrų matavimo eksperimentus atlikime ir su nepilotuojamu orlaiviu „AGAI 02“. Analizuokime orlaivio greitį. Tam tikslui sudarykime tyrimų schemą (4.6 pav.). orlaivio greitį matuosime trimis jutikliais – GPS imtuvas, orlaivio oro greičio matavimo sistema ir suprojektuotas bevielų jutiklių tinklas (naudojamas vienas jutiklis). Pastarieji jutikliai prijungti prie orlaivio penumo sistemos. Bevielio jutiklio matavimų rezultatus kaupsime kompiuteryje žemėje, GPS ir orlaivio oro greičio matavimų duomenys kaupiami orlaivio skrydžio duomenų saviraštyje.



4.6 pav. Orlaivio greičio matavimo schema naudojant tris skirtingus greičio duomenų šaltinius

Fig. 4.6. Scheme of aircraft speed measuring using three different data sources



4.7 pav. Orlaivio skrydžio duomenų saviraštyje ir bevieliu jutikliu sukaupta orlaivio greičio matavimo informacija

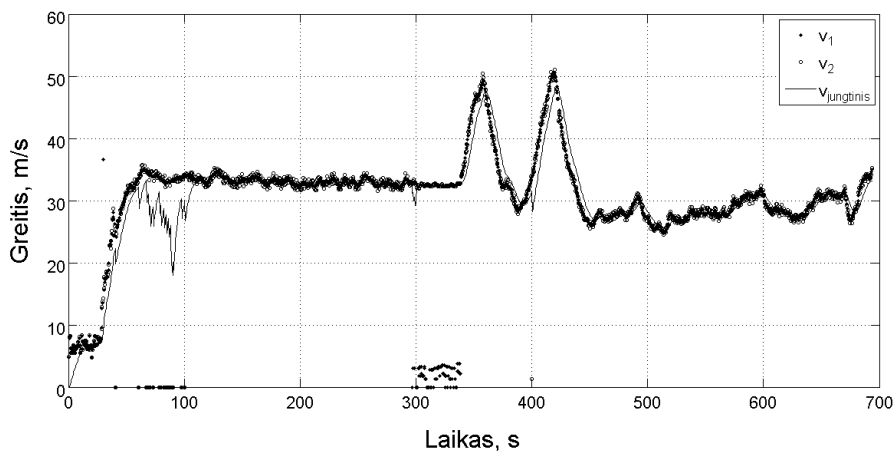
Fig. 4.7. Aircraft speed measurement information collected in aircraft flight data recorder and wireless sensor.

Atlikime eksperimento duomenų analizę (4.7 pav.). Iš eksperimento duomenų matyti, kad matavimų rezultatai yra veikiami atsitiktinio triukšmo, taip pat vizualiai nematyti ryšio kanalo trikdžių.

Abiejų eksperimentų duomenis (4.5 ir 4.7 pav.) apdorokime sudarytu informacijos saugos metodu (3.2 poskyris).

Pirma atlikime sklandytuvu LAK-20T skrydžio metu surinktų greičio matavimo duomenų apdorojimą JKF.

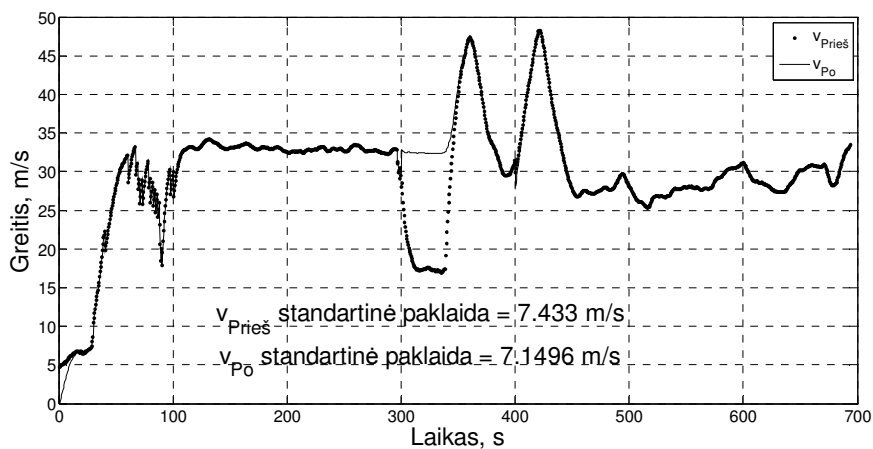
Pirma matavimų duomenis apdorokime JKF be klaidingų jutiklių izoliavimo (4.8 pav.).



4.8 pav. Sklandytuvu LAK-20T skrydžio metu surinktų greičio matavimo duomenų apdorojimas JKF

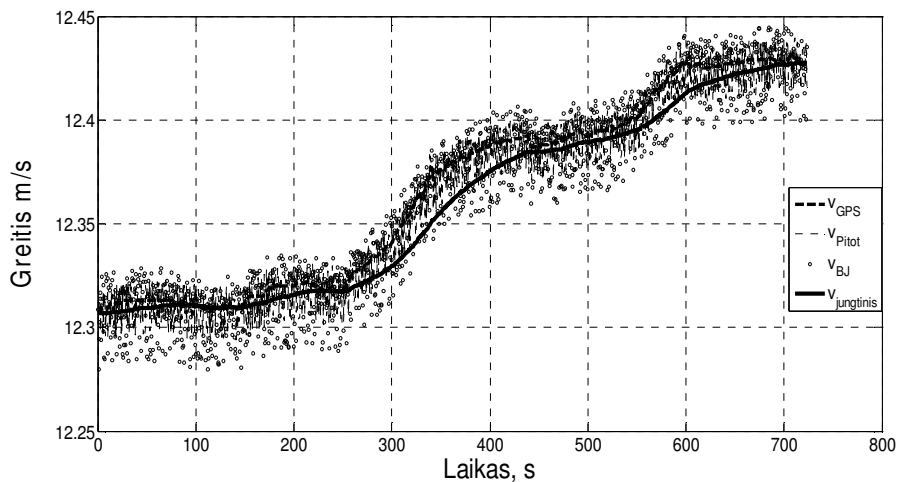
Fig. 4.8. Processing of measurement data collected during glider LAK-20T flight with JKF

Iš atlikto matavimų duomenų apdorojimo matome, kad filtras tik iš dalies atstatė skrydžio metu prarastus duomenis. Toks duomenų atstatymo atvejis yra nepakankamas, todėl matavimų duomenis apdorokime JKF su klaidingų jutiklių izoliavimo procedūra (4.9 pav.). Iš apdorojimo rezultatų matyti, kad filtras atliko klaidingo jutiklio izoliavimą (Pirmo jutiklio matavimų duomenys nuo 300 iki 350 sekundės į bendrą sistemos išėjimą netraukiami). Filtro efektyvumą įvertinkime standartiniu nuokrypiu. Prieš duomenų apdorojimą JKF standartinis nuokrypis yra 7,43 m/s, po apdorojimo JKF – 7,15 m/s. Paklaidos sumažėjimas yra 3,9%. (4.9 – 4.11 pav.).



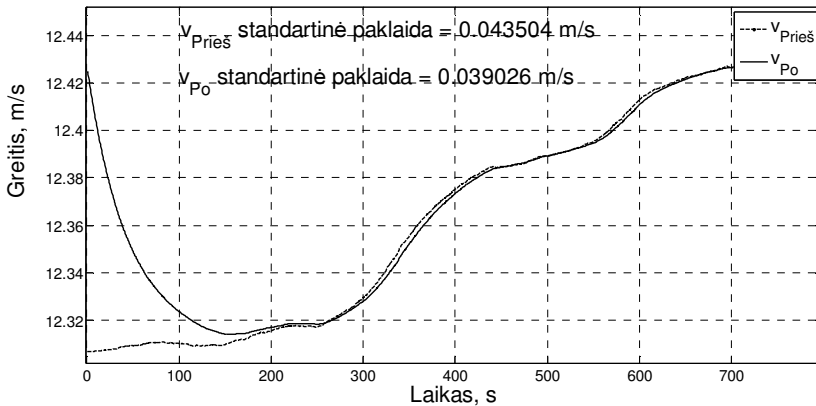
4.9 pav. Jutiklių matavimų duomenų apdorojimas JKF su klaidingo jutiklio izoliavimu

Fig. 4.9. Processing of sensor measurement data with JKF isolating the faulty sensor



4.10 pav. Bepiločių orlaiviu „AGAI 02“ skrydžio metu surinktų greičio matavimo duomenų apdorojimas JKF

Fig. 4.10. Processing of measurement data collected during UAV “AGAI 02” flight with JKF



4.11 pav. Jutiklių matavimų duomenų apdorojimas JKF su klaidingo jutiklio izoliavimu

Fig. 4.11. Processing of sensor measurement data with JKF isolating the faulty sensor

Atlikus matavimo duomenų apdorojimą JKF su klaidingo jutiklio izoliavimu, matome, kad sistemoje nebuvo analizuojamo tipo klaidų. Sudarytas filtras atliko visų jutiklių matavimo duomenų suliejimo procedūrą. Standartinis nuokrypis atlikus duomenų suliejimą JKF be jutiklio klaidos izoliavimo ir su klaidos izoliavimu yra atitinkamai 0,043 m/s ir 0,039 m/s (skirtumas – 1 %).

Iš šių rezultatų galime daryti išvadą, kad sudarytas filtras neturi neigiamos įtakos bendram sistemos veikimui ir matavimo duomenų apdorojimo tikslumui, o matavimų sistemoje įvykus jutiklio klaidoms, sudarytas klaidų nustatymo, identifikavimo ir atstatymo algoritmas leidžia izoliuoti klaidingus matavimus, taip išsaugant matuojamo parametro savybių pasikeitimą.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Šiuolaikiniuose orlaiviuose matavimų informacija perduodama ne tik laidinėmis linijomis. Pastaruoju metu stipriai pradėtos vystyti ir į eksperimentinius orlaivius diegti bevielės valdymo technologijos. Siekiant išplėsti tiriamos OIS galimybes, suprojektuotas bevielių jutiklių tinklas.
2. Siūlomo matavimų informacijos saugos metodo veikimui patvirtinti eksperimentiniai tyrimai atlikti dviem etapais:
 - Pirmasis etapas – ištirtas bevielių jutiklių tinklas. Tam panaudotas sklandytuvas LAK–20T. sklandytuvas pasirinktas kaip orlaivis turintis minimalų elektroninių įrenginių skaičių. Atliktas eksperimentas parodė,

kad MIS atsiranda klaidų – jutiklių klaidos ir matavimų informacijos praradimas duomenų perdavimo metu (ryšio sutrikimai).

- Antrasis eksperimentų etapas yra ištirti nepilotuojamo orlaivio informacinę sistemą. Tyrimas parodė, kad sistemoje atsirandančios klaidos turi įtakos bendram orlaivio valdumui.

Eksperimento duomenų apdorojimas JKF

Atlikta eksperimentų analizė parodė, kad siūlomo matavimų informacijos saugos metodo įtaka apdorotam signalui yra nuo 1 % (sistemoje nėra klaidų) iki 4 %

Bendrosios išvados

Remiantis disertaciniame darbe atliktais teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais gautos šios apibendrintos išvados:

1. Kuriant bepiločio orlaivio integruotos diagnostikos sistemą būtina spręsti penkias pagrindines uždavinių grupes:
 - diagnostikos,
 - prognostikos,
 - sąlygomis pagrįstos eksploatacijos,
 - adaptyvios kontrolės ir
 - informacijos apsaugos.
2. Nustatyta, kad mažiems bepiločiams orlaiviams tinkama sistemos patikimumo, saugos ir riboto papildomų techninių priemonių diegimo galimybių požiūriu matavimų informacijos saugos metodika paremta klaidų aptikimo ir eliminavimo principu.
3. Nustatyta, kad bepiločių orlaivių integruotoje diagnostikos sistemoje matavimų informacijos perdavimo saugos metodiką, optimalu realizuoti panaudojant rekurentinį Kalmano filtro pagrindu sudarytą filtrą.

4. Tyrimų rezultate nustatyta, kad siūloma metodika sėkmingai sprendžia prarastos informacijos išsaugojimo ir atstatymo uždavinį bevielų jutiklių tinkle esant ne mažiau dviejų duomenų šaltinių.
5. Nustatyta, kad jungtinio Kalmano filtro su klaidų izoliavimo procedūra pagrindu sukurta informacijos saugos sistema įveda ne didesnę nei 4% naudingo signalo iškraipymą lyginant su neveikiama trikdžių sistema.

Literatūra ir šaltiniai

Azam, M.; Pattipati, K.; Allanach, J.; Poll, S. and Petterson-Hine, A. 2005. In-Flight Fault Detection and Isolation in Aircraft Flight Control Systems. In Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Paper 1429.

Bae, J.; ir Kim, Y. 2010. Attitude Estimation for Satellite Fault Tolerant System using Federated Unscented Kalman Filter. International Journal of Aeronautical and Space Science, Vol. 11, No. 2, 2010, pp. 80-86, ISSN: 1229-9626.

Baruah, P., Chinnam, R. B., Filev, D. 2006 An Autonomous Diagnostics and Prognostics Framework for Condition-Based Maintenance 2006 International Joint Conference on Neural Networks Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada July 16-21, 2006

Bateman, F.; Noura, H. and Ouladsine, M. 2008. Active Fault Detection and Isolation Strategy for an Unmanned Aerial Vehicle with Redundant Flight Control Surfaces. In Proceedings of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, p. 1246–1251.

Bateman, F.; Noura, H.; and Ouladsine, M. 2007. Actuators Fault Diagnosis and Tolerant Control for an Unmanned Aerial Vehicle. In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Part of IEEE Multiconference on Systems and Control, pages 1061–1066, Singapore.

Beard, R. V. 1971. Fault accommodation in linear systems through self-reorganization. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Aeronautics and Astronautics. Thesis. Ph.D.

Beard, R. V. [Interaktyvus]. 1971. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology [Žiūrėta 2011 m. sausio 25 d.]. Prieiga per internetą < <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16415>>.

Beshears, R.; Butler, L.; 2005. "Designing for health: a methodology for integrated diagnostics/prognostics," Autotestcon, 2005. IEEE , vol., no., pp.90-95, 26-29 Sept. 2005 doi: 10.1109/AUTEST.2005.1609108.

Bird, G.; Christensen, M.; Lutz, D.; Scandura, P. A. [interaktyvus]. 2005. Use of Integrated Vehicle Health Management in the Field of Commercial Aviation. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace November, 2005 Forum Topic Area: Applications to Commercial Aviation Paper 12. [Žiūrėta 2010 m. spalio 5 d.] Prieiga per internetą < http://ti.arc.nasa.gov/projects/ishem/Papers/Scandura_Aviation.pdf>.

Blanke, M.; Kinnaert, M.; Lunze, J.; ir Staroswiecki, M. 2006. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Berlin: Springer.

Boskovic, J. D.; Redding, J.; Mehra, R. K. 2007. Stable Adaptive Reconfigurable Flight Control with Self-Diagnostics. In Proceedings of the IEEE American Control Conference, p. 5765–5770, NY.

Callan, R., Larder, B., Sandiford, J. 2006. An Integrated Approach to the Development of an Intelligent Prognostic Health Management System.

Camci, F., Chinnam, R. B. 2006. Hierarchical HMMs for Autonomous Diagnostics and Prognostics. International Joint Conference on Neural Networks Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada July 16-21, 2006

CARE. [Interaktyvus]. 2001. Innovative Action Preliminary Study on Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management. Final Report. [Žiūrėta 2008 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.eurocontrol.int/care-innov/gallery/content/public/docs/studies2001/iabg-finalreport.pdf>>.

Cert-It. [Interaktyvus]. 2010. 2010 m. CERT-LT incidentų statistika. [Žiūrėta 2011 m. liepos 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.cert.lt/doc/2010.pdf>>.

Clark, G. J.; Vian, J. L.; West, M. E.; Syrmos, V. L.; Randolph, W. F.; Hardman, W. J. 2007. Multi-platform Airplane Health Management. Aerospace Conference, 2007 IEEE 3-10 March 2007. 1-13 psl. ISSN: 1095-323X.

Coelho, T.E.; Macedo, R.; Carvalhal, P.; Afonso, J.A.; Silva, L.F.; Almeida, H.; Ferreira, M.J.; Santos, C. 2006. A Fly-By-Wireless UAV Platform Based on a Flexible and Distributed System Architecture. 4237955 abstract. Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference. Print ISBN: 1-4244-0726-5. page(s): 2359 –2364.

Davis, L. [interaktyvus]. 2010. Avionics Data Buses [Žiūrėta 2010 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą < http://www.interfacebus.com/Design_Connector_Avionics.html>.

Ding, S. X. 2008. Model-Based Fault Diagnosis Techniques. Berlin: Springer.

Drozski, G.; Saha, B. and Vachtsevanos G. 2005a. A fault tolerant architecture for unmanned rotorcraft. Proc. of the AHS International Specialists' Meeting on Unmanned Rotorcraft, Chandler, USA, January 18-20.

Drozski, G.; Saha, B. and Vachtsevanos, G. 2005b. A fault detection and reconfigurable control architecture for unmanned aerial vehicles. Proc. of the IEEE Aerospace Conference, Big-Sky, USA, March 5-12.

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.

Ducard, G. ir Geering, H. P. 2008. Efficient Nonlinear Actuator Fault Detection and Isolation System for Unmanned Aerial Vehicles. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 31(1): 225–237.

Ducard, G. ir Geering, H. P. 2006. A Reconfigurable Flight Control System based on the EMMAE Method. In Proceedings of the IEEE American Control Conference, p. 5499–5504, Minneapolis, MN, June 2006.

Edelmayer, A.; ir Miranda, M. 2007. Federated Filtering for Fault Tolerant Estimation and Sensor Redundancy Management in Coupled Dynamics Distributed Systems. Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece, July 2007.

Fudge, M., Stagliano, T., Tsiao, S. [Interaktyvus]. 2003. Non-Traditional Flight Safety Systems & Integrated Vehicle Health Management Systems. Descriptions of Proposed & Existing Systems and Enabling Technologies & Verification Methods. Final Report. The Office of the Associate Administrator for Commercial Space transportation, Federal Aviation Administration Section AST-300. August 26, 2003 [Žiūrėta 2008 m. Sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/DO3_Report_final.pdf>

Gertler, J. 1997. Fault detection and isolation using parity relations. Control Engineering Practice, 5, pp. 653-661.

Hanlon, P. D.; Maybeck, P. S. 2000a. Multiple-Model Adaptive Estimation Using a Residual Correlation Kalman Filter Bank. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 36, No. 2 April 2000

Hanlon, P. D.; Maybeck, P.S.; 2000b. Characterization of Kalman filter residuals in the presence of mismodeling. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on , vol.36, no.1, pp.114-131, Jan 2000. doi: 10.1109/7.826316

Hearns, G.; Grimble, M. J. and Johnson, M. A. 1998. Integrated Fault Monitoring and Reliable Control. In UKACC International Conference on CONTROL'98, pages 1175–1179.

Heredia, G.; Ollero, A.; 2009. Sensor fault detection in small autonomous helicopters using observer/Kalman filter identification. *Mechatronics*, ICM 2009. IEEE International Conference pp.1-6, 14-17 April 2009 doi: 10.1109/ICMECH.2009.4957236

Heredia, G.; Ollero, A.; Bejar, M.; Mahtani, R. 2007. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters, *Mechatronics*, Volume 18, Issue 2, March 2008, p. 90-99, ISSN 0957-4158,

Hide, Ch.; Moore, T.; Smith, M. 2003. Adaptive Kalman Filtering for Low-cost INS/GPS. *The Journal of Navigation*, 56, pp 143-152 doi:10.1017/S0373463302002151

Inseok, H.; Sungwan, K.; Youdan, K.; Seah, C.E.; 2010. A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol.18, no.3, pp.636-653, May 2010 doi: 10.1109/TCST.2009.2026285

Isermann, R. 2006. *Fault-Diagnosis Systems, An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. XVIII, 475 p. 227 illus. ISBN 978-3-540-24112-6.

James, M. L.; Baroth, E.; Mellinger, L.; Park, H.; Stough, T. [interaktyvus]. 2003. Integrated Vehicle Test Bed for IVHM Systems on 2nd Generation RLV. BEACON eSpace at Jet Propulsion Laboratory. [Žiūrėta 2010 m. lapkričio 4 d.] Prieiga per internetą: <<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/>>.

Kacprzynski, G. J. 2002. Enhancement of physics-of-Failure Prognostic Models with System Level Features, *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, March 2002.

Lebold, M.; Thurston, M. 2001. Open Standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems. *5th Annual Maintenance and Reliability Conference* (2001).

Ling, B.; Yu, X.; Liu, L.; 2010. The Information Fusion of Multi-sensor of Based on Federated Kalman Filter and Neural Networks. *Computational and Information Sciences (ICCIS)*, 2010 International Conference. 1099–1102 p. ISBN: 978-1-4244-8814-8.

MacConnell, J. H. 2007. ISHM & Design: A review of the benefits of the ideal ISHM system. *Aerospace Conference*, 2007 IEEE. ISSN: 1095-323X: 1-18.

Mehr, A. F.; Tumer, I. Y. 2005. Two-Level Optimization of Systems Health Monitoring in Systems with Top-Down Hierarchical Architecture. *The 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, CA. September 2005.

Mehr, A. F.; Tumer, I.; Barszcz, E. 2005 Optimal Design of Integrated Systems Health Management (ISHM) for improving the Safety of NASA's Exploration Missions: A Multidisciplinary Design Approach. *6th World Congresses on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO'06*. Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil.

Mehra, R. K.; Peschon, J. 1971. An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems. *Automatica*, vol. 7, pp. 637–640.

Mosallaei, M.; Salahshoor, K. 2008. Sensor Fault Detection using Adaptive Modified Extended Kalman Filter Based on Data Fusion Technique. *Information and Automation for Sustainability*, 2008. ICIAFS 2008. 4th International Conference. ISBN: 978-1-4244-2899-1.

Nazar, M. S. M.; 2009. A Comparative Study of Different Kalman Filtering Methods in Multi Sensor Data Fusion. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol I IMECS 2009*, March 18-20, Hong Kong.

Olive, M.; Oishi, R.; Arentz, S. 2007. AEEC Communications Security Activities. International CNS Conference 1 May 2007 Hilton Dulles Airport, Herndon, VA.

Parkinson, P. [Interaktyvus] 2009. Avionics: Security challenges in unmanned vehicle development. [Žiūrėta 2010 m. lapkričio 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.electronicweekly.com/Articles/2009/07/20/46533/avionics-security-challenges-in-unmanned-vehicle-development.htm>>.

Patton, R. J.; Uppal, F. J.; and Lopez-Toribio, C. J. 2000. Soft Computing Approaches To Fault Diagnosis For Dynamic Systems: A Survey. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, Budapest, 14-16 June 2000, 1, pp. 298-311.

Patton, R.J. and J. Chen. J. 1997. Observer-based fault detection and isolation: robustness and applications. Control Engineering Practice, 5, pp. 671-682.

Sampigethaya, K., Poovendran, R. and Bushnell, L. 2008b). Secure Operation, Control and Maintenance of Future e-Enabled Airplane, Proceedings of the IEEE special issue on Aviation Information Systems, Vol. 96, No. 12, pp. 1992-2007, December 2008.

Sampigethaya, K., Poovendran R., Bushnell, L. 2008a). Security of Future eEnabled Aircraft Ad hoc Networks. Proc. 8th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (AIAA ATIO) Conference, pp. AIAA-2008-8894.

Sasiadek, J. Z., Hartana, P. 2000. Sensor Data Fusion Using Kalman Filter. Information Fusion, 2000. FUSION 2000. Proceedings of the Third International Conference. Volume 2.

Schierman, J. D.; Ward, D. G; Hull, J. R.; Gandhi, N.; Oppenheimer, M. W. and Doman, D. B. 2004. Integrated Adaptive Guidance and Control for Re-Entry Vehicles with Flight-Test Results. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 27(6):975-988.

Stephenson, D. 2006. Boeing Frontiers. The Airplane Doctors. 2006 august, volume 05, issue 4.

Toldinas J.; Štūkys V.; Ziberkas G.; Naunikas D. 2010. Power Awareness Experiment for Crypto Service-Based Algorithms // *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija, 2010 – No. 5(101). p. 57-62.

Wei, M.; ir Schwarz, K. P. 1990. Testing a Decentralized Filter for GPS/INS Integration. Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, NV, Mar. 1990.

Welch, G., Bishop, G. 2006. An Introduction to the Kalman Filter. Šiaurės Karolinos universitetas. Kompiuterių mokslo katedra. Techninė ataskaita TR 95-041.

Witczak, M. 2007. Modeling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-linear Systems: From Analytical to Soft Computing Approaches. OhioLINK electronic book center. Lecture notes in control and information sciences, v. 354. Berlin: Springer.

Zhang, Y.; Chen, Y.; Meng, Q.; Wang, T. 2008. Fault Detection of Networked Control Systems Based on Kalman Filter. Innovative Computing Information and Control, 2008. ICICIC '08. 3rd International Conference on.

Zhang, Y.; Jiang, J. 2008. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. Annual Reviews in Control, Vol. 32, No. 2. (December 2008), pp. 229-252.

Žiliukas, A. 1998. Orlaivių techninė diagnostika ir patikimumas. Kaunas. Technologija.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose įtrauktuose į Web of Science sąrašą

Stankūnas, 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).

Rudinskas, D.; Goraj, Z.; Stankūnas, J. 2009. Security analysis of uav radio communication system, *Aviation*. Vilnius : Technika. ISSN 1648-7788. Vol. 13, no. 4, p. 116–121

Rudinskas, D.; Stankūnas, J. 2009. Bepiločių orlaivių radijo ryšio sistemų analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Transporto inžinerija*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 1, nr. 6, p. 125–128.

Straipsniai kituose leidiniuose

Stankūnas, J., Rudinskas, D. 2010. Wireless technologies to be use for measurement of wing aerodynamic characteristics. Konferencijos „*Research and Education in Aircraft Design – READ 2010*“ pranešimų medžiaga (kompaktinė plokštelė). Varšuvos technologijos universitetas, Lenkija.

Rudinskas, D. 2008. Šiuolaikinių orlaivių integruotos techninės diagnostikos sistemų kūrimo problemos. *AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS. 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „MOKSLAS–LIETUVOS ATEITIS“*, įvykusios Vilniuje 2008 m.

balandžio 17 d. Straipsnių rinkinys/ Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius: Technika.

Rudinskas, D., Stankūnas, J. 2008. Analysis of design of integrated health management systems in the small aircrafts. Tarptautinės konferencijos *Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and its Influence on Education (RRDPAE)* įvykusiųs 2008 m. spalio 17-18 d. Brno technologijos universitete (Institute of Aerospace Engineering) Čekijoje pranešimo medžiaga išleista konferencijos kompaktinėje plokštelėje. ISSN 1425-2104.

Priedai

A priedas. Klaidų modeliavimo programos kodas

%% Vienos ašies pagreitmačio ir giroskopo matavimų duomenų sujungimas.

% Dviejų jutiklių duomenys sujieti naudojant Kalmano filtrą.

% Autorius: Darius Rudinskas

% Paskutinis atnaujinimas 2011 lapkritis

close all;

clear;

%% Polinkio signalo su triukšmu modeliavimas

dt = 0.02;

t = (0:dt:20)';

x = sin(t); % Kampas (pradinis)

x_dot = cos(t); % kampinis greitis

**v_gyro = sqrt(0.3)*randn(length(t),1); % giroskopo matavimų triukšmas,
nuokrypis = 0.3**

```
gyro = x_dot + v_gyro; % Giroskopo matavimai (polinkio kitimo greitis)
v_acc = sqrt(0.3)*randn(length(t),1); % pagreitmačio matavimų triukšmas,
nuokrypis = 0.3
```

```
%Apskaičiuojamas kampas panaudojus tik giroskopo pagreitį
x_acc = x + v_acc; % kampas apskaičiuotas iš pagreičio matavimų (polin-
kio kampas)
```

```
x_gyro = cumsum(gyro*dt,1); % kampas apskaičiuojamas integruojant gi-
roskopo matavimus
```

```
% kampo spausdinimas naudojant pagreitį ir giroskopą
```

```
figure;
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot(t,[x_acc x_gyro x]);
```

```
grid;
```

```
xlabel('Laikas, s', 'FontSize',14);
```

```
ylabel('x(t), rad', 'FontSize',14);
```

```
legend('pagreitmatis','giroskopas','faktinis');
```

```
Title ('Polinkio kampo modeliavimas', 'FontSize',14);
```

```
grid on;
```

```
%% Toliau pateiktas Kalmano filtro panaudojimas.
```

```
% Kovariacijos matrica.
```

```
% Tai yra atnaujinamo žingsnis siekiant nustatyti, kaip gerai jutikliai stebi
faktinę būklę
```

```
P = [1 0; 0 1];
```

```
% R yra matavimų triukšmo kovariacija.
```

```
% Šiuo atveju tai yra 1x1 matrica, kuri nusako, kad turime 0,3 rad pagreit-
mačio drebinimą
```

```
R_angle = 0.3;
```

```
% Q yra 2x2 matrica, kuri nusako proceso triukšmo kovariaciją.
```

```
% Šiuo atveju, tai parodo kaip stipriai susijęs pagreitmatis su giroskopu.
```

```
Q_angle = 0.05;
```

```
Q_gyro = 0.5;
```

```
Q = [Q_angle 0; 0 Q_gyro];
```

```

A = [0 -1; 0 0];

q_bias = 0; % pradinis giroskopo paklaida
angle = 0; % pradinis giroskopo kampas
q_m = 0;
X = [0; 0];
x1 = zeros(size(t));
x2 = zeros(size(t));
for i=1:length(t),

    % ***** Giroskopo atnaujinimas *****
    q_m = gyro(i);

    q = q_m - q_bias; % polinkio matavimai giroskopu
    %   giroskopo paklaidų šalinimas
    %   Kovariacijos matricos išvestinės skaičiavimas
    %   Pdot = A*P + P*A' + Q

    Pdot = A*P + P*A' + Q;
    rate = q;

    % kampo įverčio atnaujinimas
    % angle += angle_dot * dt
    %   += (gyro - gyro_bias) * dt
    %   += q * dt
    %
    angle = angle + q*dt;

    %/ Kovariacijos matricos atnaujinimas */
    P = P + Pdot*dt;

    % ***** Kalmano (Pagreitmačio) atnaujinimas *****
    % C matrica yra 1x2 (matavimų x būsena) matrica, kuri yra matavimų
    % reikšmių su atitinkama būsena Jakobianas. Šiuo atveju C yra:

    C = [1 0];
    angle_err = x_acc(i)-angle;

    % Apskaičiuojamas klaidos įvertis:
    % E = C P C' + R

```

```

% Atitinkamai matricų dydžiams,
%  $E_{<1,1>} = C_{<1,2>} P_{<2,2>} C'_{<2,1>} + R_{<1,1>}$ 
% kadangi  $C_1$  yra lygus nuliui, tai mes jo neskaičiuojam.
E = C*P*C' + R_angle;

% Apskaičiuojamas Kalmano filtro stiprinimas:
%  $K = P C' \text{inv}(E)$ 
% Atitinkamai matricų dydžiams:
%  $K_{<2,1>} = P_{<2,2>} C'_{<2,1>} \text{inv}(E)_{<1,1>}$ 
% E yra  $<1,1>$ , tai jos inversija bus  $1/E$ .
% /
K = P*C'*inv(E);

% Kovariacijų matricos atnaujinimas:
%  $P = P - K C P$ 
% Atitinkamai matricų dydžiams:
%  $P_{<2,2>} -= K_{<2,1>} C_{<1,2>} P_{<2,2>}$ 

P = P - K*C*P;

X = X + K * angle_err;
x1(i) = X(1);
x2(i) = X(2);
angle = x1(i);
q_bias = x2(i);
end

% Rezultatų naudojant Kalmano filtrą spausdinimas
subplot(2,1,2);
plot(t,[x1 x]);
grid;
%plot(t,[x x1]);
xlabel('Laikas, s', 'FontSize', 14);
ylabel('x(t), rad', 'FontSize', 14);
legend('Kalmano','Faktinis');
Title('Pagaiteitmačio ir giroskopo matavimų duomenų suliejimas kalmano
filtru', 'FontSize', 14);

```

Toliau pateiksime klaidų modeliavimo dalis. Kita kodo dalis analogiška kaip ir „**Dviejų jutiklių duomenys sulieti naudojant Kalmano filtrą**”

%% Vienos ašies pagreitmačio ir giroskopo matavimų duomanų suliejimas su pagreitmačio mastelio klaida.

```
%% Klaidų modeliavimas
```

```
%% Polinkio signalo su pagreitmačio nuokrypio klaida modeliavimas
```

```
x0 = x_acc; % Kampas (pradinis). Normalus veikimas
```

```
x1 = x_acc + 2; % Mastelio klaidos įvedimas
```

```
t_f = t;
```

```
x_acc_f = zeros(1, length(t_f));
```

```
k = 0;
```

```
s = length(x_acc_f)-1;
```

```
s = s+1;
```

```
for i = 1:s
```

```
    if k < s/2
```

```
        x_acc_f(i) = x0(i);
```

```
    elseif k >= s/2 && k < s
```

```
        x_acc_f(i) = x1(i);
```

```
    end
```

```
k = k + 1;
```

```
end
```

%% Vienos ašies pagreitmačio ir giroskopo matavimų duomanų suliejimas su pagreitmačio pastoviu nuokrypio klaida.

```
%% Klaidų modeliavimas
```

%% Polinkio kampo su pagreitmačio pastovaus nuokrypio klaida modeliavimas

```
x0 = x_acc; % Kampas (pradinis). Normalus veikimas
```

```
x1 = x_acc + 2; % Mastelio klaidos įvedimas
```

```
t_f = t;
```

```
x_acc_f = zeros(1, length(t_f));
```

```
k = 0;
s = length(x_acc_f)-1;
s = s+1;
for i = 1:s
    if k < s/4
        x_acc_f(i) = x0(i);
    elseif k >= s/4 && k < s/2
        x_acc_f(i) = x1(i);
    elseif k >= s/2 && k < s
        x_acc_f(i) = x0(i);
    end
    k = k + 1;
end
```


%% Vienos ašies pagreitmačio ir giroskopo matavimų duomanų sujungimas su ryšio kanalo klaida.

%% Klaidų modeliavimas

%% Polinkio kampo su ryšio kanalo klaida modeliavimas

% Modeliuojama klaida yra 5-7 sekundės

x0 = x_acc; % Kampas (pradinis). Normalus veikimas

x1 = x_acc - x_acc; % Ryšio klaidos įvedimas

t_f = t;

x_acc_f = zeros(1, length(t_f));

k = 0;

s = length(x_acc_f)-1;

s = s+1;

for i = 1:s

if k < s/4

x_acc_f(i) = x0(i);

elseif k >= s/4 && k < ((s/4)+(s/10))

x_acc_f(i) = x1(i);

elseif k >= ((s/4)+(s/10)) && k < s

x_acc_f(i) = x0(i);

end

k = k+1;

end

g0 = x_gyro; % Kampas (pradinis). Normalus veikimas

g1 = x_gyro - x_gyro; % Ryšio klaidos įvedimas

x_gyro_f = zeros(1, length(t_f));

k = 0;

s = length(x_gyro_f)-1;

s = s+1;

for i = 1:s

if k < s/4

x_gyro_f(i) = g0(i);

elseif k >= s/4 && k < ((s/4)+(s/10))

x_gyro_f(i) = g1(i);

elseif k >= ((s/4)+(s/10)) && k < s

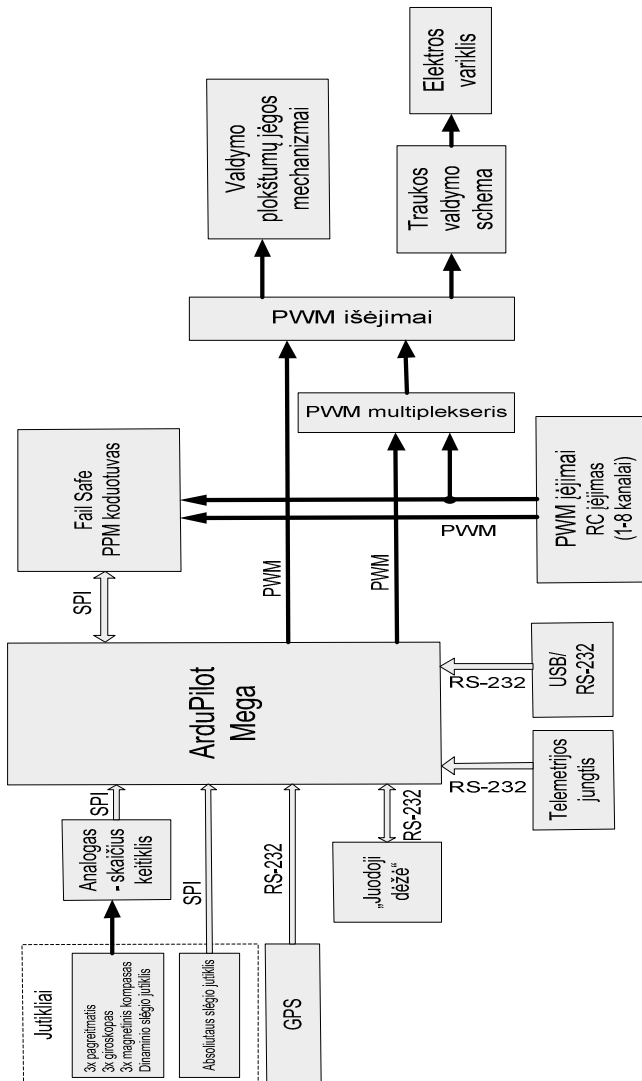
x_gyro_f(i) = g0(i);

end

k = k+1;

end

B priedas. Nepilotuojamo orlaivio valdymo sistemos struktūrinė schema



Pasirinktą sistemą sudaro aparatinė įranga:

- Autonominiam valdymui:
 - 3 – ašių giroskopas (IDG500; ISZ500);
 - 3 – ašių pagreitmatis (ADXL335A);
 - 3 – ašių magnetinis jutiklis (HMC5883L);
 - Barometrinis slėgio daviklis aukščio skaičiavimams;
 - Oro greičio jutiklis (MPXV7002DP);
 - 10Hz GPS modulis (MediaTek MT3329);
 - Baterijos įtampos jutiklis;
 - 4Mb integruota atminties mikroschema skrydžio parametrų saugojimui;
 - Telemetrijos modulis – Xbee standartas, 900 MHz.
- Rankiniam valdymui: 2,4 GHz skaitmeninis imtuvas „Spektrum“ AR7000.

Darius RUDINSKAS
BEPILLOČIŲ ORLAIVIŲ SKRYDŽIO PARAMETRŲ
MATAVIMŲ DUOMENŲ PERDAVIMO SAUGOS
METODIKOS SUKŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Matavimų inžinerija (10T)

DESIGN OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE
FLIGHT PARAMETER DATA TRANSMISSION
SAFETY METHOD

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2011 12 29. 8,25 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