

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## UÇAN OBYEKTŁƏRİN AVTONOM NAVİQASIYA MƏLUMATLARI ƏSASINDA İDARƏ OLUNMASI ÜÇÜN METODLARIN, ALQORİTMLƏRİN İŞLƏNİLMƏSİ VƏ TƏTBİQİ

İxtisas: 3338.01 – Sistemli analiz, idarəetmə və  
informasiyanın işlənməsi

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Elxan Nəriman oğlu Səbziyev**

Elmlər doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

### AVTOREFERATI

**Bakı - 2021**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası İdarəetmə Sistemləri İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçi:

akademik, t.e.d. professor  
**Telman Abbas oğlu Əliyev**

Rəsmi opponentlər:

AMEA-nın müxbir üzvü, texnika elmləri doktoru, professor  
**İsmayıl Mahmud oğlu İsmayılov**

texnika elmləri doktoru, professor  
**Tofiq İbrahim oğlu Süleymanov**

texnika elmləri doktoru, professor  
**Mütəllib Mirzəəhməd oğlu Mütəllibov**

texnika elmləri doktoru, professor  
**Ramin Rza oğlu Rzayev**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA İdarəetmə Sistemləri İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.20 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

akademik, t.e.d., prof.

**Əli Məhəmməd oğlu Abbasov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

t.e.d., prof.

**Nailə Fuad qızı Musayeva**

Elmi seminarın sədri:

t.e.d., prof.

**Bayram Qənimət oğlu İbrahimov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Keçən əsrin əvvəllərindən başlayaraq sənaye cəhətdən inkişaf etmiş ölkələrin orduları hərbi əməliyyatlar zamanı uçuş aparatlarının tətbiqini çox perspektivli hesab edirdilər. 1939-cu ildə qara qutu adı ilə elmi-texniki ədəbiyyata daxil olan uçuş parametrlərinin qeydiyyatı sisteminin kəşfi avionikada çox mütərəqqi səhifə açdı. Qara qutunun kəşfi müxtəlif prinsiplərlə işləyən uçuş aparatlarının mükəmməl layihələndirilməsi, düzgün istismarı, uçuş zamanı meydana çıxan texniki qüsurların aydınlaşdırılması, pilotların məharətinin qiymətləndirilməsi kimi məsələlərin həllində əhəmiyyətli rol oynamağa başladı. Qara qutu məlumatlarının emal alqoritmi və onların əsasında həll edilən məsələlərin dairəsi məlumatların toplanmasında iştirak edən müxtəlif sensorların (vericilərin) sayından, onların işinin əsaslandığı fiziki prinsipdən, konstruksiyasından və digər əlavə məlumatlardan asılıdır.

Bu məsələlər sırasında əsas yeri uçuş trayektoriyasının qurulması tutur. İstər uçuşdan sonra trayektoriyanın tədqiqi, istərsə də uçuş əməliyyatı gedişində uçuş aparatının cari yerinin təyin edilməsi qara qutu məlumatlarının səhih emalını tələb edir. Heç şübhəsiz ki, uçuş aparatları üçün avionika cihazlarını layihələndirən və istehsal edən müəssisələrdə toplanan məlumatları emal edən alqoritmlər və uyğun proqram təminatı mövcuddur. Belə proqram sistemlərinə, məsələn, "МОНСТР-2012" proqram-aparat kompleksini misal göstərmək olar. Lakin belə sistemlər layihə - istehsal müəssisələri tərəfindən heç kəsə verilmir, onlar haqqında elmi-texniki ədəbiyyatda rast gəlinən məlumatlar isə çox bəsitdir. Digər tərəfdən, hərbi təyyarələrin yerinə yetirdikləri tapşırıqlar və təlim-məşq uçuşları ilə bağlı məlumatlar məxfi xarakter daşıyır və qara qutuda toplanan uçuş məlumatlarının emal məqsədilə xarici ölkələrdə yerləşən müəssisələrə yönəldilməsi məqsədə uyğun hesab edilmir. Bu baxımdan qara qutu məlumatlarının emalı alqoritmlərinin işlənilməsi aktual elmi-texniki məsələdir.

Qeydə alınan sensor məlumatlarının on-line emalı əsasında uçuş aparatının cari yerinin təyin edilməsi onun nəzərdə tutulan trayektoriya (marşrut) üzrə hərəkətini idarə etməyə imkan verir. Bu daha uzaq məsafələrə uçan hərbi təyinatlı pilotsuz uçuş aparatlarının avtomatik idarəetmə sisteminin yaradılmasına imkan verir. Son zamanlar pilotsuz uçuş aparatlarının, o cümlədən onların dəstəsinin hərbi əməliyyatların keçirilməsinə cəlb olunmasının mümkünlüyü onların idarə edilməsi ilə bağlı çoxsaylı məsələlərin həll edilməsini zəruri edir. Əməliyyatlar zamanı pilotsuz uçuş aparatlarının imtinaya davamlılığının və etibarlılığının təmin olunması nöqtəyi nəzərdən belə onların proqram təminatının xarici ölkələrdən hazır şəkildə alınması məqsədəuyğun sayılır. Beləliklə, Azərbaycanda hərbi məqsədlər üçün geniş şəkildə işlənilməyə başlayan pilotsuz uçuş aparatlarının, o cümlədən onların xüsusi növü olan kvadrokopterlərin layihələndirilməsi, sazlanması və idarə olunması ilə bağlı problemlərin həlli aktual məsələ hesab olunur və dissertasiya çərçivəsində tədqiq olunur.

**Tədqiqatın obyektı və predmeti.** Dissertasiya işində baxılan məsələlər üç tədqiqat obyektini əhatə edir. Bunlardan birincisi hərbi təyyarələrin bortunda yerləşdirilmiş sensorlardan alınan məlumatlardır, onların emalı zamanı qoyulmuş məsələdən və irəli sürülən hipotezlərdən asılı olaraq, funksional analizin tədqiqat metodları tətbiq olunmuşdur.

İkinci obyekt – bərk cisim kimi modelləşdirilən uçuş obyektidir. Modelləşdirmə zamanı bərk cisim mexanikasında irəli sürülən empirik yanaşmalar, diferensial tənliklər və sərhəd məsələləri nəzəriyyəsinin üsullarından istifadə olunmuşdur.

Üçüncü tədqiqat obyektı – pilotsuz uçuş aparatları qrupudur. Birgə uçuş həyata keçirən qrupda hər bir pilotsuz uçuş aparatının uçuş strategiyasının müəyyən olunması və cari anda necə hərəkət etmək haqqında qərarqəbuletmə mexanizminin işlənməsi tədqiq olunmuşdur.

Tədqiqatın predmeti – sensor məlumatlarının emalı zamanı meydana çıxan, pilotsuz uçuş aparatının idarə edilməsi ilə bağlı,

həmçinin pilotsuz uçuş aparatları qrupunun birgə uçuşunun idarə edilməsi problemlərinin həlli üçün yanaşmaların və metodların işlənilməsidir.

**Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.** Dissertasiya işinin məqsədi uçuşdan sonra sensor məlumatları əsasında hərbi təyyarənin trayektoriyasının hesablanması, uçuş zamanı onun cari yerinin təyin olunması, pilotsuz uçuş aparatlarının avtomatik idarə olunması sisteminin işlənilməsidir. Bu məqsədə nail olmaq üçün dissertasiya işində aşağıdakı əsas vəzifələr qarşıya qoyulmuşdur:

- TECTEP-Y3 tipli cihazla təmin olunmuş hərbi təyyarənin uçuş məlumatlarında olan yüklənmə təhriflərinin aradan qaldırılması;

- Hərbi təyyarənin uçuşun ilkin dövrünə aid qara qutuda qeydə alınan yüklənmələr, oriyentasiya bucaqları və sürət məlumatları əsasında məlumatların kompleksləşdirmə əmsallarının hesablanma alqoritminin işlənilməsi;

- Qara qutuda qeydə alınması zamanı itən uçuş məlumatların bərpası üçün neyron şəbəkəsi üsulunun və şəbəkənin əmsallarını hesablamaq üçün ədədi hesabat alqoritminin işlənilməsi;

- Təyyarənin kurs bucağının filtrlənməsi, uçuş sürətinin Dopler ölçü cihazı məlumatlarına görə korreksiyası və tanqaj bucağının sazlanması üçün alqoritminin işlənilməsi;

- Uçuş trayektoriyasının tənliyinin verilənlərin xətti kombinasiyası kimi kompleksləşdirilməsi və tənliklərin əmsallarının tapılması üçün Nyuton-Rafson iterasiya usuluna əsaslanan alqoritmin işlənilməsi;

- Təyyarənin uçuş məlumatlarının kompleksləşdirilməsi məsələsinin riyazi modelinin uyğun funksionalın minimallaşdırılması məsələsi şəklində qurulması;

- Variasiya üsulunun tətbiqi ilə minimallaşdırma məsələsinin 4-cü tərtib sabit əmsallı adi diferensial tənliklər üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilməsi;

- Sərhəd məsələlərini həll etmək üçün klassik qovma üsulunun analoqunun işlənilməsi;

- Pilotsuz uçuş aparatlarının bortunda olan vericilərdən daxil olan məlumatların sazlanmasının həyata keçirilməsi zamanı müntəzəm metrikanın integral metrika ilə əvəz olunmasının əsaslandırılması;

- Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının hərəkət trayektoriyası və fəza oriyentasiyası ilə ona təsir edən amillər və idarəedici parametrlər arasında asılılığı ifadə edən riyazi modelin qurulması;

- İstismar zamanı kvadrokopterin müxtəlif qurğu və yüklərin əlavə edilməsi səbəbindən onun dəyişikliyə məruz qalmış bir sıra xarakteristik fiziki-texniki parametrlərinin hesablanması və dəqiqləşdirilməsi üçün alqoritmin işlənilməsi;

- Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya üzrə hərəkəti zamanı meydana şıxan sapmaların aradan qaldırılması üçün idarənin hesablanma alqoritminin işlənilməsi;

- Pilotsuz uçuş aparatının çəkdiyi video-foto şəkillərə görə onun yerinin təyin edilməsi məsələsinin həlli üçün coğrafi koordinatlarla kameranın monitor görüntüləri arasında biyektiv inikasin qurulma metodunun işlənilməsi;

- Ərazidə olan maneələr və nahamarlıqlar sfera tipli elementlər vasitəsi ilə verilən həndəsi xəritə əsasında nəzərdə tutulan marşrut boyunca hərəkət etmək üçün optimal trayektoriyanı müəyyən edilməsi məsələsinin riyazi modelinin qurulması;

- Mümkün rəasional trayektoriyalardan birini tapmaq üçün evristik ədədi hesablama alqoritminin işlənilməsi;

- Pilotsuz uçuş aparatların birgə uçuşunun bir operator tərəfindən effektiv şəkildə idarə edilmə mexanizmini yaratmaq üçün onlardan ibarət dəstənin sistemlər sistemi kimi təsvir edilməsi;

- Birgə uçuşda iştirak edən hər bir pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya boyunca hərəkətinin onun sürətinin tənzimlənməsilə idarə olunması üçün universal qərar qəbuletmə alqoritminin işlənilməsi;

- Baxılan hərəkət trayektoriyasının müxtəlif hissələrində pilotsuz uçuş aparatının digərləri ilə toqquşmadan təklükəsiz birgə

uçuşda iştirakını təmin edən sürət rejiminin hesabat düsturlarının alınması;

- Pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşunun idarə edilmə modelinin sazlayıcı parametrlərinin müəyyənləşdirilmə prinsiplərin işlənilməsi.

**Tədqiqat metodları.** Tədqiqat işində tətbiq olunan metodların əsasını sistemli analiz əsasında riyazi modelləşdirmə və təqribi hesablama üsulları təşkil edir.

Sensor məlumatlarının emalı əsasında uçuş obyektlərinin vəziyyətinin təyin olunması üçün funksional analizin tədqiqat metodları - eksperimental verilənlərin approksimasiyası, ən kiçik kvadrat üsulu, sonlu fərqlər üsulu, iterasiyalar üsulu və sairə tətbiq olunmuşdur.

Kvadrokopter tipli uçuş aparatlarının hərəkətinin modelləşdirilməsi, dinamik modelə daxil olan parametrlərin hesablanması və aparatın planlaşdırılan trayektoriya üzrə hərəkətin idarə edilməsi məsələlərinin həlli zamanı empirik yanaşmalar, diferensial tənliklər və sərhəd məsələləri nəzəriyyəsinin üsullarından, həmçinin təqribi hesablama üsullarından istifadə olunmuşdur.

Pilotsuz uçuş aparatlarının foto-video təsvirlərinə görə öz yerini təyin etmə məsələlərinin tədqiqi zamanı ali cəbr, analitik həndəsənin və hesablama riyaziyyatının metodları -biyektiv inikas prinsipi, ardıcıl yaxınlaşma üsulu və sairə tətbiq edilmişdir.

Birgə uçuşun idarə edilməsi zamanı hər bir pilotsuz uçuş aparatının müstəqil qərar qəbul etməsi məqsədilə System-of-system ideologiyasının prinsip və metodları istifadə olunmuşdur. Müstəqil obyekt kimi baxılan hər bir aparatın digərlərinə nəzərən fəzada vəziyyətini müəyyənləşdirmək və cari anda tələb olunan sürət verkorunu hesablamaq üçün vektor hesabının və analitik həndəsənin empirik formulları və metodları, həmçinin alqoritmlər nəzəriyyəsinin üsulları tətbiq olunmuşdur.

**Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar** aşağıdakılardır:

1. Platformalsız naviqasiya sistemi ilə təmin olunmuş hərbi təyyarənin uçuş məlumatlarında olan yüklənmə təhriflərinin aradan qaldırılması məsələsinin həll düsturları.

2. Platformalı naviqasiya sisteminə malik hərbi təyyarənin uçuşun ilkin dövrünə aid qara qutuda qeydə alınan yüklənmələr, oriyentasiya bucaqları və sürət məlumatları əsasında məlumatların kompleksləşdirmə əmsallarının hesablanma alqoritmi.

3. Qara qutuda qeydə alınması zamanı itən uçuş məlumatlarının bərpası üçün neyron şəbəkəsi üsulu və şəbəkənin əmsallarını hesablamaq üçün ədədi hesabat alqoritmi.

4. Təyyarənin kurs bucağının filtrlənməsi, uçuş sürətinin Dopler ölçü cihazı məlumatlarına görə korreksiyası və tanqaj bucağının sazlanması üçün alqoritmlər.

5. Hərbi təyyarənin uçuş trayektoriyasının tənliyinin verilənlərin xətti kombinasiyası kimi kompleksləşdirilməsi metodikası və tənliklərin əmsallarının tapılması üçün Nyuton-Rafson iterasiya usuluna əsaslanan alqoritm.

6. Təyyarənin uçuş məlumatlarının kompleksləşdirilməsi məsələsinin riyazi modelinin funksionalın minimallaşdırılması məsələsi şəklində qoyuluşu. Variasiya üsulunun tətbiqi ilə minimallaşdırma məsələsinin 4-cü tərtib sabit əmsallı adi diferensial tənliklər üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilməsi və sərhəd məsələsini həlli etmək üçün qovma üsulunun analoqu.

7. Pilotsuz uçuş aparatlarının bortunda olan vericilərdən daxil olan məlumatların uçuş haqqında əlavə məlumatların köməyi ilə sazlanmasının həyata keçirilməsi zamanı müntəzəm yaxınlaşma meyarı əvəzinə  $L_2$  metrikasında yaxınlaşma meyarının tətbiq oluna bilməsinin əsaslandırılması.

8. Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının hərəkət trayektoriyası və fəza oriyentasiyası ilə ona təsir edən faktorlar və idarəedicilərin parametrlər arasında asılılığı ifadə edən riyazi modelə söykənərək istismar zamanı kvadrokopterin müxtəlif qurğu və yüklərin əlavə edilməsi səbəbindən onun dəyişikliyə məruz qalmış bir sıra xarakteristik fiziki-texniki parametrlərinin uçuş ilkin dövrünə



aid olan məlumatlar əsasında hesablanması və dəqiqləşdirilməsi üçün alqoritm.

9. Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya üzrə hərəkəti zamanı meydana çıxan sapmaların aradan qaldırılması ilə onun idarəedilmə məsələsinin həll alqoritm.

10. Pilotsuz uçuş aparatının çəkdiyi video-foto şəkillərə görə onun cari uçuş məkanının coğrafi koordinatlarının hesablanma alqoritm.

11. Ərazidə olan maneələr və nahamarlıqlar sfera tipli elementlər vasitəsi ilə verilən həndəsi xəritə əsasında nəzərdə tutulan marşrut boyunca hərəkət etmək üçün optimal trayektoriyanın müəyyən olunma məsələsinin riyazi modeli. Mümkün rəasional trayektoriyalardan birini tapmaq üçün evristik ədədi hesablama alqoritm.

12. Pilotsuz uçuş aparatların birgə uçuşunun bir operator tərəfindən effektiv şəkildə idarə edilmə mexanizmini yaratmaq üçün onlardan ibarət dəstənin sistemlər sistemi kimi təsvir olunmasının və idarəetmə sisteminin əsas universal prinsipləri.

13. Birgə uçuşda iştirak edən hər bir pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya boyunca hərəkətinin onun sürətinin tənzimlənməsilə idarə olunması üçün universal qərarqəbuletmə alqoritm.

**Tədqiqatın elmi yeniliyi.** İşin əsas elmi yenilikləri aşağıdakılardır:

1 TECTEP-Y3 tipli cihazla təmin olunmuş hərbi təyyarənin uçuş məlumatlarında olan yüklənmə təhriflərinin aradan qaldırılması məsələsi tədqiq olunmuş, normal koordinat sisteminə nəzərən yüklənmələrin hesablanması üçün düstur təklif olunmuşdur. TECTEP-Y3 tipli cihazla təmin olunmuş hərbi təyyarənin uçuş məlumatlarının emalı zamanı hesablanmış dəqiqləşdirici əmsalların həmin təyyarənin növbəti uçuşu zamanı yerə nəzərən yüklənmələri təyin etmək üçün istifadə etmək olar.

2 Platformalı naviqasiya sisteminə malik hərbi təyyarənin uçuşun ilkin dövrünə aid qara qutuda qeydə alınan yüklənmələr,

oriyentasiya bucaqları və sürət məlumatları əsasında məlumatların kompleksləşdirmə əmsallarının hesablanma alqoritmi verilmişdir. Bu əmsallar uçuşun sonrakı dövründə kompleksləşdirmə alqoritmini tətbiq etməklə onun real vaxt rejimində qənaətbəxş trayektoriyasını almağa imkan verir. Ədədi eksperimentlərin nəticəsi bu alqoritmün müvəffəqiyyətlə tətbiq oluna biləcəyi haqqında fikir söyləməyə əsas verir.

3 Qara qutuda qeydə alınması zamanı itən uçuş məlumatlarının bərpası üçün neyron şəbəkəsi üsulu işlənmişdir. Məlumatların həcmi çox olduqda neyron şəbəkəsinin əmsallarını hesablamaq üçün ədədi hesabat alqoritmi verilmişdir. Bu alqoritm qara qutu məlumatlarının çatışmayan hissəsini tamamlamağa və uçuşun gedişini daha müfəssəl təhlit etməyə imkan verir.

4 Təyyarənin kurs bucağının filtrlənməsi, təyyarənin yerdən qalxma anının təyin edilməsi, uçuş sürətinin Dopler ölçü cihazı məlumatlarına görə korreksiyası və tanqaj bucağının sazlanması ilə bağlı ilkin emal məsələləri tədqiq edilmiş, onların həlli üçün alqoritmlər təklif olunmuşdur. Bu alqoritmlərin tətbiqi ilə məlumatları avtomatik emal etmək və avtomatlaşdırılmış qərarqəbuletmə sisteminin yaradılmasında istifadə etmək olar.

5 Hərbi təyyarənin uçuş trayektoriyasının tənliyinin verilənlərin xətti kombinasiyası kimi kompleksləşdirilməsi metodu işlənmişdir. Tənliklərin əmsallarının tapılması üçün Nyuton-Rafson iterasiya usuluna əsaslanan alqoritm təklif olunmuşdur.

6 Təyyarənin uçuş məlumatlarının kompleksləşdirilməsi məsələsinin riyazi modeli funksionalın minimallaşdırılması məsələsi şəklində qurulmuşdur. Variasiya üsulunun tətbiqi ilə minimallaşdırma məsələsi 4-cü tərtib sabit əmsallı adi diferensial tənliklər üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilmişdir. Sərhəd məsələlərini həll etmək üçün klassik qovma üsulunun analoqu işlənmişdir.

7 Pilotsuz uçuş aparatlarının bortunda olan vericilərdən daxil olan məlumatların uçuş haqqında əlavə məlumatların köməyi ilə sazlanmasının həyata keçirilməsi zamanı müntəzəm yaxınlaşma

meyarı əvəzinə  $L_2$  metrikasında yaxınlaşma meyarının tətbiq oluna bilməsi əsaslandırılmışdır.

8 Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının hərəkət trayektoriyası və fəza oriyentasiyası ilə ona təsir edən faktorlar və idarəedici parametrlər arasında asılılığı ifadə edən riyazi modelə söykənərək istismar zamanı kvadrokopterin müxtəlif qurğu və yüklərin əlavə edilməsi səbəbindən onun dəyişikliyə məruz qalmış bir sıra xarakteristik fiziki-texniki parametrlərinin uçuş ilkin dövrünə aid olan məlumatlar əsasında onlayın hesablanması və dəqiqləşdirilməsi üçün alqoritm işlənmişdir.

9 Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya üzrə hərəkəti zamanı meydana çıxan sapmaların aradan qaldırılması ilə onun idarəedilmə məsələsi tədqiq olunmuş, uyğun idarənin hesablanma alqoritmi işlənmişdir.

10 Pilotsuz uçuş aparatının çəkdiyi video-foto şəkillərə görə onun yerinin təyin edilməsi məsələsinin həlli üçün coğrafi koordinatlarla kameranın monitor görüntüləri arasında biyektiv inikas qurulması təklif edilmiş və cari uçuş məkanının coğrafi koordinatlarının hesablanması məqsədilə iterativ hesablama alqoritmi işlənmişdir.

11 Ərazidə olan maneələr və nahamarlıqlar sfera tipli elementlər vasitəsi ilə verilən həndəsi xəritə əsasında nəzərdə tutulan marşrut boyunca hərəkət etmək üçün optimal trayektoriyanın müəyyən olunma məsələsinin riyazi modeli qurulmuşdur. Rasional trayektoriya anlayışı verilmiş, mümkün rasional trayektoriyalardan birini tapmaq üçün evristik ədədi hesablama alqoritmi təklif olunmuşdur.

12 Pilotsuz uçuş aparatların birgə uçuşunun bir operator tərəfindən effektiv şəkildə idarə edilmə mexanizmini yaratmaq üçün dronlar dəstəsi sistemlər sistemi kimi təsvir olunmuş, idarəetmə sisteminin əsas universal prinsiplər təklif olunmuşdur.

13 Birgə uçuşda iştirak edən hər bir pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya boyunca hərəkətinin onun sürətinin tənzimlənməsilə idarə olunması üçün universal qərarqəbuletmə alqoritmi işlənmişdir. Baxılan hərəkət trayektoriyasının müxtəlif

hissələrində dronun digərləri ilə toqquşmadan təklükəsiz birgə uçuşda iştirakını təmin edən sürət rejiminin hesabat düsturları verilmişdir. Pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşunun idarə edilmə modelinin sazlayıcı parametrlərinin müəyyənləşdirilmə prinsipləri işlənilmişdir.

**Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.** Tədqiqatlar zamanı alınmış nəticələr həm nəzəri, həm də praktik əhəmiyyətə malikdir.

Tədqiqatlar zamanı alınmış nəticələrin nəzəri əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, təklif olunan ideyalar, metodlar və alqoritmlər uçuş aparatlarının sensor məlumatlarının emalı, idarə olunan bir dronun yaxud dronlar dəstəsinin trayektoriya üzrə stabil uçuşu və digər bu kimi problemlərin tədqiqi və həlli zamanı tətbiq oluna bilər.

Təyyarələrin uçuş məlumatlarının emalı ilə bağlı aparılan tədqiqatlar zamanı alınmış nəticələrin praktiki əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, hərbi təyyarələrin qara qutuda qeydə alınan göstəricilər əsasında istər uçuşdan sonrakı dövrdə, istərsə də on-line rejimdə uçuşun baş verdiyi müddətdə onun cari yerini, oriyentasiyasını təyin etməyə imkan verən avtomatlaşdırılmış proqram sistemləri yaradıla bilər.

Pilotsuz uçuş aparatlarının tədqiqi sahəsində alınmış nəticələrin praktiki əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, bu nəticələr müxtəlif təyinatlı dronların layihələndirilməsi, hesabatı və avtomatlaşdırılması sistemlərinin yaradılması zamanı istifadə oluna bilər.

Pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşunun həyata keçirilməsinə həsr olunmuş tədqiqatlar zamanı alınmış nəticələrin praktiki əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, onlar hərəkət trayektoriyası haqqında əvvəlcədən alınmış məlumat əsasında qrupa daxil olan hər bir aparatın müstəqil qərarqəbuletmə sisteminin yaradılmasında istifadə oluna bilər.

Təklif olunan yanaşmalar, işlənmiş riyazi modellər və alqoritmləri, uçuş aparatlarının sensor məlumatları əsasında hərəkətinin izlənməsi və avtomatik idarəetmə sistemlərinin yaradılması, həmçinin birgə uçuşun həyata keçirilmə sisteminin

işlənilməsi ilə məşğul olan elmi-tədqiqat institutlarında və layihələ-konstruktor müəssisələrində istifadə oluna bilər.

**İşin aprobasiyası və tətbiqi.** Dissertasiyanın əsas nəticələri "Sistemlərin identifikasiyası və idarəetmə məsələləri" ("Идентификация систем и задачи управления") üzrə 3-cü və 4-cü Beynəlxalq elmi konfranslarda (2004-2005, Moskva), "Müasir elmin və təhsilin aktual problemləri" ("Актуальные вопросы современной науки и образования") üzrə 2-ci Beynəlxalq elmi-praktik konfransında (2020, Penza), "İnformasiya və Kommunikasiya Texnologiyalarının və İdarəetmə Sistemlərinin inkişafında müasir istiqamətlər" ("Modern Directions of Development of the Information and Communication Technologies and Control Systems") üzrə 10-cu Beynəlxalq konfransında (2020, Xarkov), "Hərb elmi və təhlükəsizlik məsələləri" üzrə elmi-praktik konfransında (2019, Bakı), "Sənaye Tətbiqləri ilə İdarəetmə və Optimallaşdırma" ("Control and Optimization with Industrial Applications") üzrə 7-ci Beynəlxalq konfransında (2020, Bakı), "Modelləşdirmə, idarəetmə və informasiya texnologiyaları" ("Modeling, control and information technologies") üzrə 4-cü elmi və praktik konfransında (2020, Rivne) dinlənilmiş, həmçinin Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının İdarəetmə sistemləri institutunun, Bakı Dövlət Universitetinin Tətbiqi Riyaziyyat elmi tədqiqat institutunun seminarlarında müzakirə olunmuşdur.

Təklif olunan yanaşmalar, işlənmiş riyazi modellər baxılan məsələlərin həllinin tədqiqinə və uyğun həll alqoritmlərinin işlənilməsinə tətbiq olunmuşdur.

**Müəllifin şəxsi töhfəsi** məsələlərin düzgün qoyuluşunun formalizasiyası və məqsədə çatmaq üçün tədqiqat istiqamətinin seçilməsindən ibarətdir. Bundan əlavə, alınan bütün nəticələr və tədqiqat üsulları şəxsən müəllifə məxsusdur.

**Müəllifin nəşrləri.** Dissertasiya üzrə müəllifin 21 elmi işi, Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında AAK-ın tövsiyə etdiyi nəşriyyatlarda 14 məqalə, 7 tezisi nəşr olunmuşdur.

## **Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası İdarəetmə Sistemləri İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiyanın həcmi və strukturu.** Dissertasiya işi girişdən, 5 fəsildən, işin əsas nəticələrindən və 223 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından. İşin ümumi həcmi 234 səhifə, əsas həcmi isə 1 cədvəl, 16 şəkil daxil olmaqla 210 (40000 işarə) səhifə təşkil edir. O cümlədən, 1-ci fəsilin həcmi 70000, 2-ci fəsilin həcmi 98000, 3-cü fəsilin həcmi 64000, 4-cü fəsilin həcmi 96000 və 5-ci fəsilin həcmi 56000 işarədən ibarətdir.

## **DİSSERTASIYANIN MƏZMUNU**

**Birinci fəsil** üç paragrafdan ibarət olub tədqiq olunan məsələlərlə bağlı üç istiqamətdə mövcud ədəbiyyatın icmalına həsr olunmuşdur.

Əsasən açıq elmi-texniki ədəbiyyatda və İnternet resurslarında dərc olunan materialların tədqiqinə həsr olunmuş birinci istiqamət təyyarələrin qara qutu məlumatlarının emal alqoritmlərini əhatə edir. Belə ki, müasir təyyarələrdə müxtəlif sensorlar tərəfindən ölçülən uçuş məlumatlarının bir hissəsi ilkin emal edilərək təyyarənin cihaz panelində əks olunur və pilotun uçuşu idarə etməsinə xidmət edir. Digər tərəfdən isə çevirmə prosedurlarının tətbiqi ilə rəqəmsallaşdırılaraq qara qutuya yazılır və sonradan onların emalı əsasında uçuşun necə baş verməsini tədqiq etmək olur. Lakin ölçmə, kodlaşdırma, yadda saxlama kimi əməliyyatlarda baş verən xətlər səbəbindən bilavasitə qara qutudan alınan məlumatlar əsasında təyyarənin necə uçduğunun aydınlaşdırılması mürəkkəb prosesə çevrilir. Bu istiqamətlə bağlı məlumatların filtrlənməsi və müxtəlif fiziki prinsiplərə söykənən ölçü cihazlarının məlumatlarının kompleksləşdirilməsi ilə uçuş trayektoriyasının qurulmasına həsr olunmuş məqalələrin qısa icmalı verilmiş, göstərilmişdir ki, sensor qurğularının texniki göstəricilərinin ehtimal xarakteristikaları məlum

olmadıqda məlum filtrləmə alqoritmləri az effektiv olur, ona görə də digər yeni yanaşmaların işlənilməsinə ehtiyac var.

Həmçinin göstərilmişdir ki, bir tərəfdən hərbi təyinatlı sistemlərin, digər tərəfdən kommersiya yönümlü elmi-texniki məhsulun tərkib hissəsi olmaqla uçuş məlumatlarının emalı üzrə müxtəlif ölkələrdə yaradılan proqram komplekslərində tətbiq olunan yanaşmalar açıq ədəbiyyatda çap olunmur. Ona görə də Azərbaycanda istismar olunan hərbi təyyarələrin uçuş məlumatlarının emalı sistemi ölkənin öz mütəxəssisləri tərəfindən yaradılmalıdır.

İkinci istiqamətə – pilotsuz uçuş aparatlarının idarə olunması və müxtəlif tapşırıqları yerinə yetirməsi ilə bağlı uçuş trayektoriyasının planlaşdırılması, onun trayektoriya boyunca uçuşunun idarə edilməsi, səpmələrin aradan qaldırılması, avtonom idarə olunma və bu kimi bir sıra nəzəri və praktik həll olunmalı məsələləri üçün təklif olunan yanaşmalar aiddir. Göstərilmişdir ki, təklif olunan həllərin müvəffəqiyyətlə tətbiqi konkret uçuş aparatının tipindən, konstruksiyasından, texniki göstəricilərindən, istismar şərtlərindən və irəli sürülən funksional tələblərdən asılıdır. Ona görə də tələb olunan məsələlərin həllinə yönəldilmiş yeni aparatların layihələndirilməsi zamanı ədəbiyyatda verilmiş tədqiqatların müxtəlif variantlarına baxmaq, lazım gəldikdə, yeni yanaşmalar işləmək lazımdır.

Ədəbiyyat icmalının üçüncü istiqaməti pilotsuz uçuş aparatlarının qrup şəklində uçuşunun idarə olunması ilə bağlı müxtəlif müəlliflərin tədqiq etdiyi məsələlər və yanaşmaların müzakirəsinə həsr olunmuşdur. Burada əsas diqqət idarəetmədə qərarqəbuletmə sisteminin arxitekturasına yönəldilmişdir, onların müqayisəli analizi verilmişdir. Göstərilmişdir ki, multi-agent sisteminin təsnifatı nöqteyi nəzərdən, ən əlverişli idarəetmə sistemi faydalılıq prinsipi əsasında işləyən model əsaslı məqsədəyönlü hibrid sistemi hesab oluna bilər. Bu baxımdan, birgə uçuş həyata keçirən pilotsuz uçuş aparatlarının hər biri əməliyyat ərazisi və ətraf mühit haqqında apriori məlumata malik olması, qarşıya qoyulmuş ümumi məqsəddən çıxış etməsi və yalnız yaxın ətrafında yerləşən dronlar

haqqında məhdud informasiya mübadiləsi əsasında müstəqil qəbul etməsi qane edici dərəcədə effektiv olar.

Birinci fəsildə şərh olunan tədqiqatlar [16, 17, 19]-də dərc olunmuşdur.

Dörd paragrafdan ibarət olan **ikinci fəsil** qara qutu məlumatları əsasında hərbi təyyarənin uçuş trayektoriyasının bərpası zamanı meydana çıxan problemlər və onların aradan qaldırılması məsələlərinə həsr olunmuşdur.

**İkinci fəslin 1-ci paragrafında** ТЕСТЕР-УЗ tipli platformasız naviqasiya cihazı ilə təmin olunmuş uçuşu başa vuraraq aerodroma qayıtmış hərbi təyyarənin trayektoriyasının müəyyənləşdirilməsi məsələsi tədqiq olunur. Hesab olunur ki, uçuş həyata keçirmiş təyyarənin  $t = 0$  – uçuş zolağından ayrılma anında normal koordinat sistemində  $s_x(0), s_y(0), s_z(0)$  və sürət vektorunun  $v_x(0), v_y(0), v_z(0)$  komponentləri, həmçinin eniş zamanı  $t = T$  – təyyarənin zolağa toxunma anında onun  $s_x(T), s_y(T), s_z(T)$  koordinatları və sürət vektorunun  $v_x(T), v_y(T), v_z(T)$  komponentləri məlumdur.

Uçuş məlumatlarında olan yüklənmə təhrifləri yüklənmələrin inteqrallanması ilə trayektoriyanın qənaətbəxş qurulmasına imkan vermədiyindən təhriflərin yaranma səbəbləri təhlil olunur və onların aradan qaldırılması üçün metod təklif olunur. Belə hipotez irəli sürülür ki, təyyarə ilə bağlı lokal koordinat sisteminə nəzərən yüklənmələrin<sup>1</sup> ölçülmüş və qara qutuda yazılan kodlaşdırılmış  $p_x, p_y, p_z$  qiymətləri məlum  $k_x(p_x), k_y(p_y), k_z(p_z)$  çevirmə funksiyalarının tətbiqi ilə müəyyən aralıq  $\{\hat{n}_x = k_x(p_x), \hat{n}_y = k_y(p_y), \hat{n}_z = k_z(p_z)\}$  qiymətlərini alır ki, onlar da həqiqi yüklənmələrlə xətti asılılıq düsturları ilə bağlıdır:

---

<sup>1</sup> Ефимов, В.В. Основы авиации. Часть I. Основы аэродинамики и динамики полета летательных аппаратов: Учебное пособие. / – Москва: МГТУ ГА, – 2003. – 64 с.



$$\begin{cases} n_x = \alpha_x \hat{n}_x + \beta_x, \\ n_y = \alpha_y \hat{n}_y + \beta_y, \\ n_z = \alpha_z \hat{n}_z + \beta_z. \end{cases}$$

elə naməlum  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, \beta_x, \beta_y, \beta_z$ , əmsallarının tapılması tələb olunur ki, hesablanan yüklənmələr əsasında bərpa olunan trayektoriya  $t=T$  anında təyyarənin koordinatlarının  $s_x(T), s_y(T), s_z(T)$  və sürət vektorunun  $v_x(T), v_y(T), v_z(T)$  olmasını təmin etsin. Real uçuş verilənləri üzrə bu əmsalların tapılması və uyğun hesablamalar göstərir ki, alınan trayektoriyalar real trayektoriyaya kifayət qədər yaxın olur.

Qeyd edək ki, platformasız naviqasiya cihazlarınınin məlumatları bilavasitə təyyarə ilə bağlı  $Oxyz$  koordinat sistemində nəzərə alınır. Həmin məlumatların yerlə bağlı  $OXYZ$  sistemində nəzərə alınaraq giraskoplar tərəfindən ölçülən oriyentasiya bucaqları ( $\psi$  – kurs bucağı -  $OXYZ$  koordinat sisteminin  $OX$  oxu ilə təyyarənin uzununa oxunun  $OXY$  müstəvisinə proyeksiyası arasında qalan bucaqdır,  $\theta$  – tanqaj bucağı - təyyarənin uzununa  $OX$  oxu ilə  $OXY$  müstəvisi arasında qalan bucaqdır,  $\gamma$  – kren bucağı, - kurs bucağı sıfır olduqda, təyyarənin eninə  $OY$  oxu ilə  $OXYZ$  koordinat sisteminin  $OY$  oxu arasında qalan bucaqdır) əsasında generasiya olunan koordinatların çevirmə matrisinə vurmaq lazımdır.

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [7]-də dərc olunmuşdur.

**İkinci fəslin 2-ci paraqrafında** ИКВ tipli<sup>2</sup> platformalı naviqasiya sisteminə malik təyyarənin uçuş məlumatlarının real vaxt rejimində kompleksləşdirilmə üsulu ilə emalı məsələsi tədqiq olunmuşdur. ИКВ tipli qurğusunun digər məlum naviqasiya sistemlərindən əsas fərqi ondan ibarətdir ki, onun akselerometrləri

---

<sup>2</sup> Соловьев, В.И., Шабалов, П.Г. Инерциальные навигационные системы. Учеб. пособие. / – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, – 2011. – 72 с.

fəzada öz oriyentasiyasını saxlayan giroskoplu platformanın üzərində yerləşdirilir.

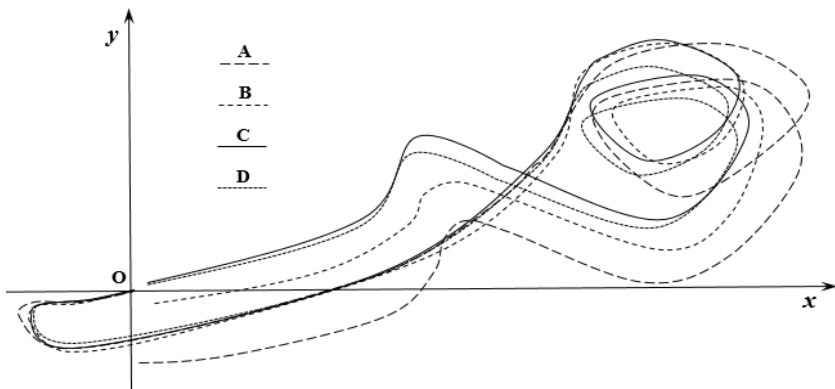
Məsələnin mahiyyəti ondan ibarətdir ki, təyyarənin uçuş trayektoriyasının təyini əsasən iki tip məlumat kanalı əsasında ola bilər, bunlardan biri – təyyarənin ölçülən sürətinin bir dəfə inteqrallanması ilə, ikincisi – yüklənmələr əsasında təyin olunan təcillərin iki dəfə inteqrallanması ilə həyata keçirilir. Lakin qara qutuda qeydə alınmış parametrlərin təhriflərə və xətalara malik olması səbəbindən bu kanalların heç biri uçuş parametrlərinin birbaşa emalı zamanı uçuş trayektoriyasının qanəedici dəqiqliklə təyin edilməsinə imkan vermir.

Qutusunda qeydə alınan uçuş parametrlərinin siyahısına  $n_x$ ,  $n_y$  və  $n_z$  yüklənmələri yazıldığına görə uçuşun ilkin müddətinə aid hər bir baxılan  $t$  anı üçün bir tərəfdən yüklənmələr kanalından  $a_x, a_y, a_z$  təcilləri və onların inteqralı kimi tapılan  $\mathbf{V}(t) = (V_x(t), V_y(t), V_z(t))$  sürət vektoru hesablanır. Digər tərəfdən sürətlər kanalından daxil olan  $\mathbf{U}(t) = (U_x(t), U_y(t), U_z(t))$  vektoru götürülür. Təklif olunur ki, elə sabit  $\mathbf{E}_v$  və  $\mathbf{E}_u$  matrisləri tapılsın ki, onların köməyi ilə  $\mathbf{V}(t)$  və  $\mathbf{U}(t)$  sürətlərinin

kompleksləşdirilməsi əsasında hesablanan 
$$\int_0^t (\mathbf{E}_v \mathbf{V}(\tau) + \mathbf{E}_u \mathbf{U}(\tau)) d\tau$$

trayektoriyasının uçuşun əvvəlinə aid hissəsi GPS məlumatları əsasında alınan trayektoriyaya kvadratik metrikada maksimum yaxın olsun. Bu metod hərbi təyyarənin uçuşun ilkin dövrünə aid qara qutuda qeydə alınan yüklənmələr, oriyentasiya bucaqları və sürət məlumatları əsasında məlumatların kompleksləşdirmə əmsallarını hesablamağa imkan verir. Bu əmsallar uçuşun sonrakı dövründə kompleksləşdirmə alqoritmini tətbiq etməklə onun real vaxt rejimində qənaətbəxş trayektoriyanı almağa imkan verir.

Ədədi eksperinemtlerin nəticəsi bu alqoritmin müvəffəqiyyətlə tətbiq oluna biləcəyi haqqına fikir söyləməyə əsas verir (şəkil 1).



**Şəkil 1. Uçuşun müxtəlif məlumatlar əsasında qurulmuş trayektoriyalarının müqayisəsi: (A) - yüklənmələr üzrə; (B) - sürət məlumatlarına görə; (C) – kompleksləşdirilmənin nəticələrinə görə; (D) - GPS məlumatları əsasında.**

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [10, 15]-də dərc olunmuşdur.

**İkinci fəslin 3-cü paraqrafı** qara qutuya yazılan zaman itən uçuş məlumatlarının bərpasına həsr olunmuşdur.

Məlumdur ki, təyyarənin qara qutusunda qeydə alınan uçuş məlumatları sensorlardan daxil olan və hər biri binar koda çevirmiş  $N=256$  koddan ibarət olmaqla bir birinin ardınca yazılan kadrılardan ibarətdir. İnformasiya texnologiyası baxımından "kadr" binar komponentlərdən ibarət bir "record"dur. Hər bir kadr uçuşun 1 saniyəlik müddətini əhatə edir. Praktika göstərir ki, bir sıra hallarda uçuş məlumatının qara qutuya yazılması və ya qara qutudan digər maqnit daşıyıcılarına köçürülməsi zamanı onların bir hissəsinin itməsi baş verir. Bu fakt özünü onda göstərir ki, məlumatların qeydə alınması zamanı bəzi hallarda kadrda 256 binar kod əvəzinə daha az, müəyyən  $M (M < N)$  sayda kod yazılmış olur. Bu zaman əvvəlcədən məlum olmur ki, kadrda hansı ölçməyə uyğun kod ya kodlar itib, ona görə də uçuş məlumatlarının emalı zamanı belə kadrları yararsız hesab etməklə nəzərdən atırlar. İtməmiş kəmiyyətlərin

kadrda yerinin tapılması və qiymətlərinin bərpası üçün aşağıdakı kimi neyron şəbəkəsi üsulunun tətbiq edilməsi təklif olunmuşdur.

Tutaq ki,  $\mathbf{x}(t_i) = (x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_N(t_i))$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ,  $t_i = i \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t = \text{const}$  kadrda qeydə alınan kəmiyyətlər ardıcılığının vektor yazılışdır. Adətən bu kəmiyyətlər arasında bir-biri ilə güclü korelyasiyaya malik üç qrup kəmiyyətləri fərqləndirirlər: uzununa kanala aid olan, eninə kanala aid olan və hündürlük kanalına aid olan kəmiyyətlər.  $\mathbf{y}(t_i) = (y_1(t_i), y_2(t_i), \dots, y_m(t_i))$  vektor funksiyası ilə  $\mathbf{x}(t_i)$  vektorunun komponentlərinin bərpa olunması tələb olunan o alt çoxluğunu işarə edək ki, onlar adı çəkilən kanallardan birinə aid olmaqla güclü korelyasiyaya malik olsunlar. Giriş məlumatları olaraq zaman üzrə  $\{\mathbf{y}(t_i), i = 1, 2, \dots, p\}$  ardıcılığına baxaq. Təklif olunur ki, müəyyən bir  $k < p$  nömrəsi üçün  $\mathbf{y}(t_i)$  -lərə nəzərən xətti avtoreqresiya modelini (neyron şəbəkəsini) naməlum  $w_1, w_2, \dots, w_k$  əmsallarından asılı olaraq aşağıdakı kimi qurulsun:

$$\mathbf{y}(t_s) = \sum_{j=1}^k w_j \mathbf{y}(t_{s-k-i+j}), \quad s = k+1, k+2, \dots, p.$$

Real qara qutu məlumatlarının böyük həcmə malik olmasını nəzərə alaraq onların emalında çəki əmsallarının hesablanması alqoritmin işlənməsi zamanı Xoletski sxemi tətbiq edilmişdir<sup>3</sup>.

Bu paragrafda şərh olunan tədqiqatlar [1, 4, 5]-də dərc olunmuşdur.

**İkinci fəslin 4-cü paragrafı** qırıqçı təyyarələrin qara qutusunda toplanan bəzi uçuş parametrlərinin ilkin emalına həsr olunmuşdur. Məlumdur ki, qara qutu məlumatlarının emalı zamanı daha bir spesifik problemi həll etmək zərurəti yaranır. Bu problem müxtəlif göstəricilərin ölçü sistemi, sensorların sazlanması və bu

---

<sup>3</sup> Fox, L. Practical solution of linear equations and inversion of matrices // Nat. Bur. Standards App. Math. – 1954. Ser.39, p.1–54.

kəmiyyətlərin hesabat alqoritmlərində iştirak etmə şərtləri ilə bağlı olur. Ona görə də sensor məlumatlarının istifadəyə hazırlanması ilə bağlı ilkin emal nəzərdə tutulmalıdır. Bu məqsədlə, 4-cü paraqrafda kurs bucağının filtrlənməsi, təyyarənin yerdən qalxma anının təyin edilməsi, hərəkət sürətinin Dopler ölçü cihazı<sup>4</sup> məlumatlarına görə korreksiyası və tanqaj bucağının sazlanması məsələlərinin alqoritmləri şərh olunmuşdur.

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [21]-də dərc olunmuşdur.

**Üçüncü fəsil** üç paraqraftan ibarət olub hərbi təyyarələrin qara qutu məlumatlarının kompleksləşdirilməsi üzrə digər nəzəri yanaşmalara və tətbiq olunan inteqral-kvadratik meyarın əsaslandırılmasına həsr olunmuşdur.

**Üçüncü fəslin 1-ci paraqrafında** təyyarənin həqiqi uçuş trayektoriyasının hesablanması üçün qurulan diferensial tənliyin sağ tərəfinin ölçülən kəmiyyətlərin kombinasiyası şəklində axtarılması təklif olunur. Məsələnin mahiyyətini aşağıdakı kimi şərh etmək olar. İdeal halda tənliyi ətalət sisteminə nəzərən yazılmış real  $\mathbf{s}(t) = (x(t), y(t), z(t))$  trayektoriyasının birinci və ikinci törəməsi uyğun olaraq qara qutu məlumatlarının ilkin emalından əldə olunan  $\mathbf{v}(t)$  sürəti və  $\mathbf{a}(t)$  təcili ilə üst-üstə düşməlidir. Lakin faktik olaraq  $\frac{d}{dt}\mathbf{s}(t) \neq \mathbf{v}(t)$  və  $\frac{d^2}{dt^2}\mathbf{s}(t) \neq \mathbf{a}(t)$  müşahidə olunur, həmçinin barometrik hündürlük ölçənin  $h(t)$  göstəricisi real  $y(t)$  funksiyasından fərqli olur. Deyilənləri nəzərə alaraq uçuş məlumatlarının kompleksləşdirilməsi ilə bağlı belə bir hipotez irəli sürülür ki, uçuş məlumatları əsasında bərpa edilən göstəricilərin elə xətti kombinasiyası var ki, onun qiyməti həqiqi trayektoriya üçün yazılmış uyğun kombinasiya ilə üst-üstə düşür.

---

<sup>4</sup> Сарайский, Ю.Н. Аэронавигация: Часть I: Основы навигации и применение геотехнических средств: Учебное пособие. / Ю.Н.Сарайский, И.И.Алешков. – СПб: СПбГУГА, – 2010, – 302 с.

Bundan çıxış edilərək uçuş aparatının yerini təyin edən  $\mathbf{s} = (x(t), y(t), z(t))$  vektoru aşağıdakı xətti diferensial tənliklər sisteminin həlli kimi axtarıla bilər:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2}{dt^2} x(t) - k_1 \frac{d}{dt} x(t) = a_x(t) - k_1 \sqrt{v^2(t) - \left( \frac{d}{dt} y(t) \right)^2} \cos \psi(t); \\ \frac{d^2}{dt^2} y(t) - k_2 y(t) = a_y(t) - k_2 h(t); \\ \frac{d^2}{dt^2} z(t) - k_3 \frac{d}{dt} z(t) = a_z(t) - k_3 \sqrt{v^2(t) - \left( \frac{d}{dt} y(t) \right)^2} \sin \psi(t); \\ t \in (0, T). \end{array} \right.$$

Burada  $a_x = a_x(t)$ ,  $a_y = a_y(t)$ ,  $a_z = a_z(t)$  kəmiyyətləri uyğun olaraq yerlə bağlı koordinat sisteminin  $Ox$ ,  $Oy$  və  $Oz$  oxları üzrə yüklənmələr əsasında hesablanmış təcillərdir,  $h = h(t)$  – barometrik hündürlükölçən cihazı tərəfindən hesablanan uçuş hündürlüyüdür,  $\psi = \psi(t)$  – kurs bucağıdır,  $v = v(t)$  – həqiqi sürətdir,  $k_1, k_2, k_3$  – kompleksləşdirmə əmsallarıdır,  $T$  isə uçuşun davam etmə müddətidir.

$y(t)$ ,  $x(t)$ ,  $z(t)$  funksiyasının  $k_1, k_2, k_3$  kompleksləşdirmə parametrlərindən asılılığı olmasını göstərmək üçün onları aşağıdakı kimi yaza bilərik:

$$x = x(k_1, t), \quad y = y(k_2, t), \quad z = z(k_3, t).$$

İrəli sürülmüş hipotezlərə uyğun olaraq elə  $k_1, k_2, k_3$  əmsallarının təyin edilməsi tələb olunur ki,  $|x(k_1, T) - x_T|$ ,  $|y(k_2, T) - y_T|$ ,  $|z(k_3, T) - z_T|$  fərqləri minimal olsun, burada

$(x_T, y_T, z_T)$  –uçuş aparatının (təyyarənin) qayıtdığı aerodromda enmə yerinin koordinatlarıdır.

Kompleksləşdirmə məsələsinin bu qoyuluşunda diferensial operatorların əmsallarının hesablanması tələb olunur. Bu baxımdan tədqiq olunan məsələ tərs riyazi məsələlər sinfinə aid edilə bilər.

Məsələnin strukturu elədir ki, o, müstəqil məsələlərə parçalana və növbə ilə  $k_2, k_1$  və  $k_3$ -ə nəzərən həll oluna bilər. Əvvəlcə müəyyən dəqiqliklə  $k_2$  əmsalının təxmini qiyməti təyin olunur.

$k_2 > 0$  hesab edərək,  $\alpha = \sqrt{k_2}$  işarə edilir.  $y(k_2, t)$ -ə nəzərən yazılmış tənliyin  $\{e^{\alpha t}, e^{-\alpha t}\}$  fundamental həllərindən istifadə edilməklə qurulan ümumi həllə Laqranjın sabitin variasiya üsulunu tətbiq edilərək  $\alpha$  -ya nəzərən aşağıdakı qeyri-xətti tənlik alınır:

$$\frac{y_0(e^{\alpha T} - e^{-\alpha T})}{2\alpha} - y_T + \frac{1}{2\alpha} \int_0^T (e^{\alpha(T-\tau)} - e^{-\alpha(T-\tau)}) (a_y(\tau) - \alpha^2 h(\tau)) d\tau = 0.$$

Bu tənliyin həlli üçün Nyuton-Rafson iterasiya üsulu<sup>5</sup> tətbiq edilir və  $k_2$  əmsalı tapılır. Anoloji hesabat sxeminin yazılması ilə  $k_1$  və  $k_3$  əmsalları da hesablanıla bilər.

Bu metod nəzəri xarakter daşıyır. Məlum olduğu kimi, uçuş məlumatları diskret zaman anlarında ölçülərək qara qutuda qeydə alınır. Ona görə də, metodun praktik tətbiq olunması üçün onun diskret analoqu işlənməlidir və hər bir uçuş aparatının (təyyarənin) çoxsaylı uçuş məlumatlarının emalına tətbiq olunmalıdır. Hesab olunur ki, kombinasiya əmsalları hər baxılan uçuş aparatı (təyyarə) üçün fərqli ola bilər və həmin uçuş aparatının (təyyarənin) müxtəlif

---

<sup>5</sup> Мак-Кракен, Д., Дорн У. Численные методы и программирование / Мак-Д.Кракен, У.Дорн. – Москва: Мир, – 1977. – 583 с.

uçşları üzrə hesablanan əmsallarının orta qiyməti məlumatların kompleksləşdirilməsi üçün tətbiq oluna bilər.

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [2, 3, 11]-də dərc olunmuşdur.

**Üçüncü fəslin 2-ci paraqrafında** təyyarənin həqiqi uçuş trayektoriyasının hesablanması üçün müxtəlif kanallardan daxil olan məlumatların kompleksləşdirmə məsələsinin adi diferensial tənlik üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilməsi və həll alqoritmi verilmişdir. Bu məsələnin qoyuluşunu belə ifadə etmək olar:

- Zamandan parametrik asılı olan elə trayektoriya tapmaq tələb olunur ki, onun doğurduğu sürət uçuş aparatının (təyyarənin) qara qutu məlumatlarının emalından alınan hərəkət sürətinə, təcili isə yüklənmələrlə təyin olunan təcilə yaxın olsun.

Qeyd edək ki, uçuş hündürlüyü barometrik və/və ya radiotexniki hündürlükölçən cihazı vasitəsi ilə qənaətbəxş nəticələr verdiyini nəzərə alaraq bu paraqrafda diqqət hərəkətin üfüqi göstəricilərinə yönəldilmişdir.

Məsələnin riyazi formalizasiyası aşağıdakı kimi yazıla bilər.

Hesab olunur ki, müxtəlif kanallara aid qara qutu məlumatlarının ilkin emalı nəticəsində uçuş aparatının (təyyarənin) bütün uçuş müddəti üçün hərəkət sürətinin və təcilinin komponentləri təyin olunmuşdur:  $\mathbf{v}(t) = (v_x(t), v_y(t))$ ,  $\mathbf{a}(t) = (a_x(t), a_y(t))$ .

Uçuş aparatının (təyyarənin)  $\mathbf{S}(t) = (x(t), y(t))$  vektor funksiyası kimi verilən elə hərəkət trayektoriyasını tapmaq tələb olunur ki, onun birinci tərtib  $\frac{d}{dt}\mathbf{S}(t)$  törəməsi  $\mathbf{v}(t)$  -yə, ikinci tərtib

$\frac{d^2}{dt^2}\mathbf{S}(t)$  törəməsi isə  $\mathbf{a}(t)$  vektoruna "yaxın" olsun.

İki funksiyanın yaxın olması dedikdə, onların fərqinin kvadratları cəminin minimallığı başa düşülür.  $x = x(t)$  və  $y = y(t)$  komponentləri özünü bir birindən asılı olmayaraq müstəqil funksiyalar kimi apardığından, tələb olunan trayektoriyanın tapılması məsələsi bir birindən asılı olmayan aşağıdakı iki  $\mathfrak{F}_x(x(t))$  və



$\mathfrak{S}_y(y(t))$  funksionalının minimumunun tapılması məsələsinə gətirilir:

$$\mathfrak{S}_x(x(t)) \equiv \int_0^T \left( \left( \frac{d^2}{dt^2} x(t) - a_x(t) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt} x(t) - v_x(t) \right)^2 \right) dt \rightarrow \min,$$

$$\mathfrak{S}_y(y(t)) \equiv \int_0^T \left( \left( \frac{d^2}{dt^2} y(t) - a_y(t) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt} y(t) - v_y(t) \right)^2 \right) dt \rightarrow \min.$$

Bu tələblərə trayektoriyanın başlanğıcında və sonunda təyyarənin koordinatlarının və sürətinin məlum qiymətlərini ifadə edən sərhəd şərtləri əlavə edilir:

$$\begin{cases} x(0) = x_{00}, & \frac{d}{dt} x(0) = x_{01}, \\ x(T) = x_{T0}, & \frac{d}{dt} x(T) = x_{T1}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} y(0) = y_{00}, & \frac{d}{dt} y(0) = y_{01}, \\ y(T) = y_{T0}, & \frac{d}{dt} y(T) = y_{T1}. \end{cases}$$

Burada  $x_{00}, x_{01}, x_{T1}, x_{T1}, y_{00}, y_{01}, y_{T1}, y_{T1}$  qiymətləri məlum kəmiyyətlər hesab olunur. Məsələləri həll etmək məqsədilə funksionalların variasiyasının sıfıra bərabərlik şərtindən  $x(t)$  və  $y(t)$  funksiyalarına nəzərən aşağıdakı şəkllə malik Eyler tənlikləri alınır:

$$\frac{d^4}{dt^4} x(t) - \frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{d^2}{dt^2} a_x(t) - \frac{d}{dt} v_x(t), \quad t \in (0, T),$$

$$\frac{d^4}{dt^4} y(t) - \frac{d^2}{dt^2} y(t) = \frac{d^2}{dt^2} a_y(t) - \frac{d}{dt} v_y(t), \quad t \in (0, T).$$

Yuxarıda deyildiyi kimi, naviqasiya cihazları uçuş parametrlərini zamanın müxtəlif diskret anlarında ölçür. Bunu nəzərə alaraq Eylər tənlikləri üçün yazılmış şərhəd məsələlərini həll etmək üçün onların diskret analoqları yazılmışdır. Həmin tənliklər 4-cü tərtibli olduğundan, onların ədədi həlli üçün qovma üsulunun analoqu işlənmişdir.

Bu paragrafda şərh olunan tədqiqatlar [6, 8]-də dərc olunmuşdur.

**Üçüncü fəsilin 3-cü paragrafı** "kompleksləşdirmə məsələlərində inteqral meyarın tətbiqinin əsaslandırılması" adlanır. Uçuş aparatlarının parametrlərinin zamandan kifayət qədər hamar asılı olmasına baxmayaraq təhriflərin aradan qaldırılması üçün yanaşmalarda müntəzəm metrika əvəzinə faktik olaraq ən kiçik kvadratlar üsulu tətbiq edir. Belə hallarda müntəzəm metrikanın inteqral-kvadratik metrika ilə əvəz olunmasının nə dərəcədə əsaslı olması aydınlaşdırılmalıdır.

Məsələnin mahiyyətini izah etmək üçün yüklənmələrin timsalında filtrləmə alqoritmini bir də nəzərdən keçirək. Əslində elə  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_3$  əmsallarının tapılması tələb olunmalıdır ki,

$$\mathfrak{J}_C(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_3) \equiv \max_{t \in [0, T]} \left| \mathbf{V}(t) - \int_0^t \mathbf{a}(\tau, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_3) d\tau \right|$$

funksionalı minimum qiymət alsın, lakin həmin funksional əvəzinə

$$\mathfrak{J}_{L_2}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_3) \equiv \left\| \mathbf{V}(t) - \int_0^t \mathbf{a}(\tau, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_3) d\tau \right\|$$

funksionalı tətbiq olunur. Riyazi baxımdam belə yanaşma, məsələnin həllinin kəsilməz funksiyalar fəzasında baxılması əvəzinə  $W_2^1$  fəzasında<sup>6,7</sup> baxılmasıdır.

Digər tərəfdən qeyd edilməlidir ki, filtrləmə məsələlərində iştirak edən funksiyalar uçuş aparatının sürətini əks etdirdiyi üçün müəyyən məhdudiyyətlərə tabedir. Belə ki, aparatın ala bildiyi təcil onun mühərriklərinin gücündən asılıdır və həmişə müəyyən sabitlə məhduddur. Qeyd edilən məhdudiyyət şərti daxilində göstərmək olur ki, baxılan funksionalı  $L_2$  mənada minimallaşdıran ardıcılıq müntəzəm metrikaya görə də fundamentaldır. Hətta, müntəzəm metrikanın qiyməti  $L_2$  metrikanın qiymətinin  $2/3$  tərtibi ilə yuxarıdan məhdudlaşır. Deyilənlərin riyazi formalizasiyası  $W_2^1[0, 1]$  fəzasının elementləri üçün aşağıdakı kimi verilə bilər.

**Teorem.**  $u \in W_2^1[0, 1]$  və  $|u'(t)| \leq K$  şərtlərini ödəyən funksiyalar çoxluğunu  $\Omega$  işarə edək. Onda, istənilən  $u \in \Omega$  üçün

$$\|u\|_{C[0,1]}^2 \leq \sqrt{3K} \|u\|_{L_2[0,1]}$$

burada  $\|u\|_{C[0,1]} = \max_{t \in [0,1]} |u(t)|$ ,  $\|u\|_{L_2[0,1]} = \sqrt{\int_0^1 |u(t)|^2 dt}$ .

Dissertasiya işində bu teorem isbat edilmişdir. Bu paraqrafta şərh olunan tədqiqatlar [9]-də dərc olunmuşdur.

**Dördüncü fəsil** kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatlarının uçuşunun idarə edilməsi ilə bağlı məsələlərə həsr olunmuşdur. Digər texniki vasitələrlə müqayisədə pilotsuz uçuş aparatlarının tətbiqi

<sup>6</sup> Владимиров, В.С. Обобщенные функции в математической физике. – Москва: Наука, – 1979. – 320 с.

<sup>7</sup> Михайлов, В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных / В.П.Михайлов. – Москва: Наука, – 1976. – 391 с.

zamanı bir sıra risklərin azalması onların geniş yayılmasına stimül vermişdir. Bu səbəbdən də pilotsuz uçuş aparatlarının yaradılması və bu zaman meydana çıxan problemlərin həlli ilə müxtəlif ölkələrdə çoxsaylı müəssisələr və mütəxəssislər məşğul olurlar. Son illərdə Azərbaycanda da pilotsuz uçuş aparatlarının işlənilməsi və istehsalı ilə məşğul olan müəssisələr meydana gəlmişdir. Bir müddət AMEA-nın Yüksək Texnologiyalar Parkında, həmçinin bir sıra xüsusi müəssisələrdə Müdafiə Nazirliyinin və Dövlət Sərhəd Xidmətinin sifarişi ilə pilotsuz uçuş aparatlarının istehsalı ilə məşğul olmağa başlamışlar. Bu kimi müəssisələr öz fəaliyyətinin ilkin dövründə çox zaman pilotsuz uçuş aparatlarının standart modellərini istehsal edirsə, sonradan onların modernləşdirilməsi, yeni funksiyaların əlavə edilməsi, istismar zamanı meydana çıxan problemlərin və yeni məsələlərin həll edilməsi zərurəti yaranır. Beləliklə, pilotsuz uçuş aparatlarının idarə olunması ilə bağlı bir sıra problemlər meydana çıxır. Bu problemlər sırasında pilotsuz uçuş aparatının xarakteristik parametrlərinin hesablanması, uçuşunun planlaşdırılan trayektoriya üzrə idarə edilməsi, müxtəlif əks-əlaqə məlumatları əsasında pilotsuz uçuş aparatının cari yerinin təyin olunması kimi məsələlər vardır. Adı çəkilən məsələləri həll etmək üçün ilk növbədə baxılan pilotsuz uçuş aparatının adekvat riyazi modeli qurulmalıdır.

Ona görə də **dördüncü fəslin 1-ci paragrafı** kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının riyazi modelinin işlənilməsinə həsr olunmuşdur.

Riyazi modelin qurulması zamanı layihələndirilən kvadrokopterin konstruksiyasından, onun istismarı ilə bağlı irəli sürülən texniki şərtlərindən və irəli sürülən funksional tələblərdən irəli gələrək aşağıdakı razılaşmadan çıxış edilmişdir:

- pilotsuz uçuş aparatları bərk cism kimi baxıla bilər;
- kvadrokopterin qolları kifayət qədər simmetrikdir;
- kvadrokopter onun pərlərini fırladan və kvadrokoptərə simmetrik bərkidilmiş 4 ədəd eyni mühərriyə malikdir;
- kvadrokopterin mühərriklərini şəkil 2-dəki kimi işarə etsək, 1-ci və 3-cü pər saat əqrəbi istiqamətində, 2-ci və 4-cü pər isə əks istiqamətdə fırlanma momenti yaradır;

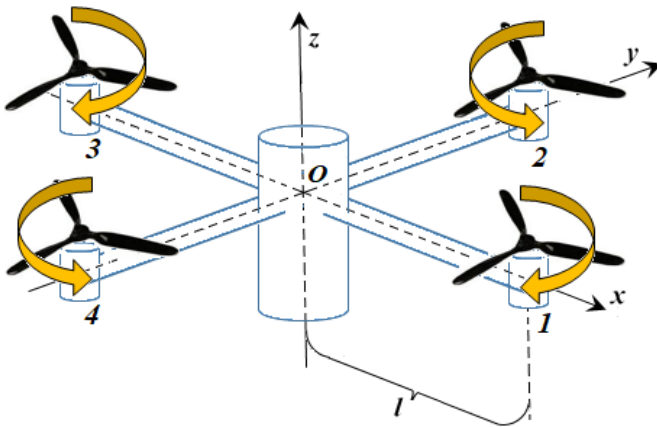
- havanın müqavimət qüvvəsi hərəkət sürətinin əksinə yönəlməklə onun kvadratı ilə mütənasibdir;

- kvadrokopterin fırlanma bucaq sürətləri kiçik olduğundan onun hərəkəti zamanı meydana çıxan giroskopik qüvvələrin təsiri nəzərə alınmaya bilər;

- ağırlıq qüvvəsi və aerodinamik müqavimət qüvvəsi pilotsuz uçuş aparatının kütlə mərkəzinə təsir edir, ona görə də bu qüvvələr moment yaratmır;

- kvadrokopterin kütləsi yalnız onun qolları üzrə paylanıb, başqa sözlə, pilotsuz uçuş aparatının fırlanma ətalət matrisi diaqonal şəkli malikdir.

Kvadrokopterin cari koordinatlarını  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  işarə edək.



**Şəkil 2. Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının sxematik təsviri: 1-ci və 3-cü pər saat əqrəbi istiqamətində, 2-ci və 4-cü pər isə əks istiqamətdə fırlanma momenti yaradır.**

Bərk cisim mexanikası qanunlarına əsaslanaraq kvadrokopterin hərəkətinin riyazi modelini aşağıdakı tənliklər sistemi ilə ifadə edə bilərik:

Qüvvələrin balansına görə:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} v_x(t) + \frac{C_a}{m} \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} v_x(t) - \\ - w_z(t) v_y(t) + w_y(t) v_z(t) = \frac{g}{m} \sin \vartheta(t), \\ \frac{d}{dt} v_y(t) + w_z(t) v_x(t) + \frac{C_a}{m} \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} v_y(t) - \\ - w_x(t) v_z(t) = \frac{g}{m} \sin \gamma(t) \cos \vartheta(t), \\ \frac{d}{dt} v_z(t) - w_y(t) v_x(t) + w_x(t) v_y(t) + \\ + \frac{C_a}{m} \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} v_z(t) = \frac{g}{m} \cos \gamma(t) \cos \vartheta(t) + \frac{k}{m} \sum_{j=1}^4 \omega_j^2 \end{array} \right.$$

və momentlərin balansına görə

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \psi(t) \frac{d^2}{dt^2} \vartheta(t) + \cos \psi(t) \sin \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) + \\ + \frac{J_{xx} - J_{yy}}{J_{xx}} w_y(t) w_z(t) = \frac{kl}{J_{xx}} (\omega_2^2 - \omega_4^2), \\ - \cos \psi(t) \frac{d^2}{dt^2} \vartheta(t) + \sin \psi(t) \sin \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) + \\ + \frac{J_{xx} - J_{zz}}{J_{xx}} w_x(t) w_z(t) = \frac{kl}{J_{yy}} (\omega_1^2 - \omega_3^2), \\ \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) + \cos \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) + \frac{J_{yy} - J_{xx}}{J_{zz}} w_x(t) w_y(t) = \\ = \frac{b}{J_{zz}} (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2). \end{array} \right.$$

Burada

$w_x(t)$ ,  $w_y(t)$ ,  $w_z(t)$  – pilotsuz uçuş aparatının fırlanma bucaq sürətidir,

$$v_x(t) = \frac{d}{dt} x(t), \quad v_y(t) = \frac{d}{dt} y(t), \quad v_z(t) = \frac{d}{dt} z(t) \quad - \quad \text{sürət}$$

vektorunun komponentləridir,

$\psi(t)$ ,  $\vartheta(t)$ ,  $\gamma(t)$  – kurs, tanqaj, kren bucaqlarıdır,

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  – pərlərin fırlanma bucaq sürətidir,

$m$  – pilotsuz uçuş aparatının ümumi kütləsidir,

$l$  – kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının qollarının uzunluğudur,

$k$  – pərlərin fırlanma tezliyi ilə generasiya olunan qüvvə arasında mütənasiblik əmsəlidir,

$C_a$  – havanın müqavimət əmsəlidir,

$b$  – pərlərin fırlanma tezliyi ilə kvadrokopterinin şaquli oxu ətrafında yaranan fırlanma momenti arasında mütənasiblik əmsəlidir,

$J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$  – diaqonal şəklinə malik fırlanma ətalət matrisinin elementləridir,

$g$  – sərbəstdüşmə təcildir.

Beləliklə, məsələnin  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  giriş verilənləri ilə  $\psi(t)$ ,  $\vartheta(t)$ ,  $\gamma(t)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  çıxış verilənləri arasında əlaqəni ifadə edən riyazi model qurulmuşdur. Modelə daxil olan bütün kəmiyyətlər yerə nəzərən daxil edilmiş ətalət sisteminə nəzərən hesablanır.

Modelin qurulmasına dair tədqiqatlar [13]-də 141-147-ci səhifələrdə dərc olunmuşdur.

**Dördüncü fəslin 2-ci paragrafı** kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının istismarı ilə bağlı dəyişməyə məruz qalan bəzi xarakteristik parametrlərin avtomatik hesablanması məsələsinə həsr olunmuşdur. Belə ki, yerinə yetirilməsi nəzərdə tutulan tapşırıqlardan asılı olaraq pilotsuz uçuş aparatına əlavə edilən qurğular (foto-video kamera, radio-retranslyator, müxtəlif formaya malik bağlamalar, yüklər və sairə) onun aerodinamik və texniki xarakteristikalarını müəyyən qədər dəyişir. Aerodinamik xüsusiyyətlərin dəyişməsi ona səbəb olur ki, uçuş aparatının nəzərdə tutulmuş trayektoriya üzrə hərəkət etməsi üçün pərlərin hesablanmış rejimlərdə fırlanması kifayət etmir və bu rejimlərdə dəyişiklik etmək zərurəti meydana

çıxır. Beləliklə, pərlərin adekvat iş rejimlərinin hesablanması üçün uçuş aparatının riyazi modelinə daxil olan bəzi parametrləri imkan daxilində korrektə etmək məsələsi meydana çıxır.

Tədqiqatlar zamanı qarşıya belə bir məsələ qoyulmuşdu ki, kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının idarəetmə modelinə (riyazi modelə) daxil olan bir sıra vacib parametrlər kvadrokopterin uçuşu zamanı avromatik hesablınsın və model korrektə olunsun. Hesab olunur ki, bu məsələni həll etmək üçün uçuşun ilk saniyələrində idarəedici parametrlərdən (pərlərin fırlanma tezliyi) və kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatında yerləşdirilmiş naviqasiya cihazlarından əldə olunan məlumatlardan istifadə etmək olar.

Məsələnin tədqiqi zamanı aşağıdakı məqamlara diqqət yetirildi:

- uçuş aparatının riyazi modelinə daxil olan fiziki-texniki göstəricilər sırasında  $l, m, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}, C_a, k, b$  parametri vardır;

- kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının konstruksiyasının onun qollarına nəzərən simmetrikliliyi  $J_{xx} = J_{yy}$  hesab etməyə əsas verir;

- momentlər balansını ifadə edən tənliklər sistemi  $\frac{J_{xx}}{l} = \frac{J_{yy}}{l}$ ,

$\frac{J_{zz}}{l}$  və  $\frac{b}{l}$  nisbətlərinə nəzərən invariantdır;

- kvadrokopterin idarə olunmasını həyata keçirmək üçün 6 ədəd  $m, \frac{J_{xx}}{l} = \frac{J_{yy}}{l}, \frac{J_{zz}}{l}, C_a, k, \frac{b}{l}$  kəmiyyətlərini bilmək kifayət edir.

Deyilənləri nəzə alaraq, momentlər balansını ifadə edən tənliklər sistemini aşağıdakı kimi yazmaq olar:



$$\left\{ \begin{array}{l} \left( + \sin \psi(t) \frac{d^2}{dt^2} \vartheta(t) + \cos \psi(t) \sin \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) + w_y(t) w_z(t) \right) \frac{J_{xx}}{l} + \\ \quad + w_y(t) w_z(t) \frac{J_{zz}}{l} = k(\omega_2^2 - \omega_4^2), \\ \left( - \cos \psi(t) \frac{d^2}{dt^2} \vartheta(t) + \sin \psi(t) \sin \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) + w_x(t) w_z(t) \right) \frac{J_{xx}}{l} - \\ \quad - w_x(t) w_z(t) \frac{J_{zz}}{l} = k(\omega_1^2 - \omega_3^2), \\ \left( \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) + \cos \vartheta(t) \frac{d^2}{dt^2} \gamma(t) \right) \frac{J_{zz}}{l} - (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \frac{b}{l}. \end{array} \right.$$

Momentlər balansı sisteminin belə yazılışı imkan verir ki, uçuşun ilk anlarına aid olan məlumatlar əsasında  $\frac{J_{xx}}{l} = \frac{J_{yy}}{l}, \frac{J_{zz}}{l}, \frac{b}{l}$  kəmiyyətləri hesablınsın, sonra isə qüvvələr balansı sistemindən yerdə qalan  $m, C_a, k$  kəmiyyətləri təyin olunsun. Beləliklə, məsələnin təklif olunan həll alqoritmi uçuşun ilkin dövründə hərəkəti idarəetmə tənliklərini ifadə edən riyazi modelin tətbiq oluna bilməsi üçün kifayətedici sayda parametrlərin avtomatik təyin olunmasına imkan verir.

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [13]-də 147-150-ci səhifələrdə dərc olunmuşdur.

Pilotsuz uçuş aparatının yerinə yetirməli olduğu istənilən tapşırıq, təbiidir ki, onun operator tərəfindən tərtib olunmuş yaxud avtomatik planlaşdırma sisteminin generasiya etdiyi yerə nəzərən təsvir olunan müəyyən bir trayektoriya üzrə uçması ilə bağlı olur.

Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının sadələşdirilmiş hərəkət modeli ona səbəb olur ki, nəzərdən atılmış faktorlar (küləyin təsiri, kvadrokopterin balanslaşdırılmasında buraxılan xətalər və sairə) hesabına aparat planlaşdırılmış trayektoriyadan kənara çıxır. Bu zaman pilotsuz uçuş aparatının bütün hərəkət trayektoriyası boyunca səpmələrinin minimallaşdırılması məsələsi meydana gəlir.

Oxşar məsələlər müxtəlif tədqiqatçıların, məsələn, И.М.Гостев<sup>8</sup>, V.Klein<sup>9</sup>, K.P. Lievens<sup>10</sup> və digərlərinin tədqiqatlarında baxılmışdır. Həmin tədqiqatlarda pilotsuz uçuş aparatının oriyentasiyası Eyler bucaqları ilə verilir və bu bucaqlar kompüter simulyasiyası üçün çox münasibdir. Lakin hazırda pilotsuz uçuş aparatlarında quraşdırılan naviqasiya qurğuları Krilov bucaqlarını, yaxud həmin bucaqların törəmələrini (dəyişməsinə) ölçür. Deyilənlərdən çıxış edərək **dördüncü fəslin 3-cü paragrafı** kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının sensorlarından (naviqasiya cihazlarından) əldə olunan məlumatların emalı əsasında onun hərəkətinin korrektə edilməsinin riyazi modelinin tədqiqinə həsr olunmuşdur.

Məsələnin həlli üçün fərz edilir ki, giroskop və akselerometr (yaxud GPS) məlumatlarının emalı əsasında pilotsuz uçuş aparatının cari yerinin koordinatları və sürəti hesablanmışdır, məlumdur. Həmçinin hesab edilir ki, pilotsuz uçuş aparatının oriyentasiyası və onun güc qurğularının (mühərriklərinin) pərlərinin fırlanma tezliyi məlumdur.

Bir qayda olaraq uçuş aparatının nəzərdə tutulan hərəkət trayektoriyası düyün nöqtələri verilən sınıq xətt kimi təsvir olunur. İdarəetmə məsələsi belə ifadə oluna bilər:

Kvadrokopterin planlaşdırılan  $L_p = \{x_p(t), y_p(t), z_p(t)\}$  trayektoriyası,  $M$  kütləsi, cari  $t_0$  anında  $\{x(t_0), y(t_0), z(t_0)\}$  koordinatları və  $\left\{\frac{d}{dt}x(t_0), \frac{d}{dt}y(t_0), \frac{d}{dt}z(t_0)\right\}$  uçuş sürəti məlumdur.

Elə paylanmış  $\Delta F$  idarəedici qüvvəsini tapmaq lazımdır ki, qısa  $\Delta t$

---

<sup>8</sup> Гостев, И.М. Методы идентификации графических объектов на основании геометрической корреляции // – Дубна: Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2010. т.41, вып.1, – с. 49–96.

<sup>9</sup> Klein, V. Estimation of Aircraft Aerodynamic Parameters from Flight Data // Progress in Aerospace Sciences, – 1989. Vol.26, – p. 1-77.

<sup>10</sup> Lievens, K.P. Single GPS Antenna Attitude Determination of a Fixed Wing Aircraft Aided with Aircraft Aerodynamics / K.P.Lievens, J.A.Mulder, P.A.Chu – San-Francisco: AIAA, – 2005. – p. 72-78.

müddəti ərzində pilotsuz uçuş aparatının planlaşdırılmış uçuş trayektoriyasından sapması aradan qaldırılsın.

Baxılan anda pilotsuz uçuş aparatının cari vəziyyəti ilə planlaşdırılmış trayektoriya üzərində onun olmalı olduğu nöqtənin koordinatları fərqi uyğun olaraq  $\Delta x = x(t) - x_p(t)$ ,  $\Delta y = y(t) - y_p(t)$ ,  $\Delta z = z(t) - z_p(t)$  işarə etsək, onda trayektoriyadan sapmanı kompensasiya edən əlavə qüvvə üçün tənliklər sistemini belə yazmaq olar:

$$\begin{cases} M \frac{d^2}{dt^2} \Delta x(t) = \Delta F_x, \\ M \frac{d^2}{dt^2} \Delta y(t) = \Delta F_y, \\ M \frac{d^2}{dt^2} \Delta z(t) = \Delta F_z. \end{cases}$$

Bu fərqi mühərriklərin yaratdığı qüvvəyə əlavə etməklə sapmanı aradan qaldırmaq üçün tələb olunan  $\hat{F}$  qüvvəsini tapa bilərik. Hesab edilir ki, sapmanın aradan qaldırılması zamanı mühərriklərin yaratdığı qüvvə əlavə momentlər yaratmamalıdır. Kvadrokopterin lokal koordinat sisteminə nəzərən məlum cari momentləri  $M_{O_x}$ ,  $M_{O_y}$ ,  $M_{O_z}$  kimi işarə etsək, onda sapmanın aradan qaldırılması üçün pərlərin fırlanma tezliklərinin yeni qiymətlərini aşağıdakı tənliklər sistemindən hesablamaq olar:

$$\left\{ \begin{array}{l} k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 = |\hat{\mathbf{F}}|, \\ kl(\omega_2^2 - \omega_4^2) = M_{Ox}, \\ kl(\omega_1^2 - \omega_3^2) = M_{Oy}, \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) = M_{Oz}. \end{array} \right.$$

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [12]-də dərc olunmuşdur.

**Dördüncü fəslin 4-cü paraqrafında** video-kamera təsvirlərinə görə pilotsuz uçuş aparatının yerinin təyin edilməsi məsələsi tədqiq olunur.

Yuxarıda deyildiyi kimi, pilotsuz uçuş aparatının naviqasiya cihazlarından əldə olunan məlumatların emal olunması ilə onun yerini təyin etmək olar. Lakin emal nəticələri inteqral xarakteri daşdığından ölçmələrdə baş verən xətlər hesabına uçuş aparatının cari yerinin hesablanma dəqiqliyi azalır. Uçuşun idarə olunması zamanı toplanan xətlərin azaldılması məqsədilə pilotsuz uçuş aparatının cari koordinatlarına da alternativ məlumat mənbələri hesabına müntəzəm olaraq düzəlişlər etmək məqsədəuyğun sayılır. Alternativ məlumat mənbəyi kimi uçuş aparatında yerləşdirilmiş video-foto kameralar vasitəsilə çəkilən şəkillər çıxış edə bilər.

Şəkillərin emal olunması ilə uçuş aparatının öz yerini tapması müxtəlif prinsiplərlə həyata keçirilə bilər<sup>11,12,13</sup>. Mövcud elmi tədqiqatlarda həll olunan problemdən, şəkilləri çəkən video-foto kameraların xüsusiyyətlərindən, eyni zamanda çəkilmiş şəkillərin

<sup>11</sup> Безменов, В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции / – Казань: КГУ, – 2009. –86 с.

<sup>12</sup> Краснопевцев, Б.В. Фотограмметрия. – Москва: УПП "Репрография" МИИГАиК, – 2008. –160 с.

<sup>13</sup> Мартынова, Л.А. Определение координат и параметров движения объекта на основе обработки изображений / Л.А.Мартынова, А.В.Корякин, К.В.Ланцов [и др.] // Компьютерная оптика, – 2012. Т.36, №2, – с. 266-273.

sayından, obyektlərin identifikasiya dəqiqliyindən və sairə digər tələblərdən asılı olaraq müxtəlif yanaşmalar tətbiq olunur.

Bu paraqrafda təqdim olunan yanaşmada video-foto görüntülər əsasında pilotsuz uçuş aparatının yerinin hesablanması məsələsinə baxılır və məsələnin həlli üçün aşağıdakı prinsiplər rəhbər tutulur:

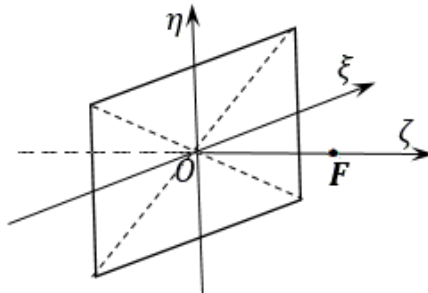
- Pilotsuz uçuş aparatı təfərrindən çəkilən şəkillərdə əks olunan ərazilər kifayət qədər kiçik miqyaslara malik olduğundan bu ərazilərə müstəvi hissəsi kimi baxmaq olar.

- Şəkillərdə tanınan üç ədəd real obyektin şəklə nəzərən hesablanan koordinatları ilə onların coğrafi koordinatları arasında müntəzəm xarakterə malik biyektiv inikas qurmaq olar.

- Pilotsuz uçuş aparatının naviqasiya məlumatları əsasında müəyyən olunan oriyentasiyasına görə müşahidə olunan obyektlərə nəzərən onun yerinin təyin olunması üçün qurulmuş biyektiv inikas tətbiq oluna bilər.

Video-foto təsvirlərdə obyektlərin identifikasiyası (tanınması) məsələsi müxtəlif tədqiqatlarda şərh olunmuşdur<sup>14</sup>, hesab edirik ki, video-foto şəkillərdə obyektlərin identifikasiya məsələsi həll olunmuşdur və onların coğrafi koordinatları məlumdur.

Məsələni həll etmək üçün video-kamera monitoruna nəzərən  $O\xi\eta\zeta$  düzbucaqlı koordinat sistemi daxil edilmişdir (şəkil 3).



**Şəkil 3. Monitora nəzərən  $O\xi\eta\zeta$  lokal koordinat sistemi**

---

<sup>14</sup> Казбеков, Б.В. Идентификация подвижных наземных объектов с борта беспилотного летательного аппарата / Дисс.кандидата технических наук / – Москва, 2013. – 159 с.

Tutaq ki, pilotsuz uçuş aparatı öz video-kamerası ilə yer səthində  $A_1, A_2, A_3$  kimi üç nöqtə müşahidə edir və bu nöqtələrin coğrafi koordinatları (coğrafi en və uzunluq) məlumdur.  $A_j$  nöqrəsinin coğrafi koordinatlarını uyğun olaraq  $(v_j, u_j)$  işarə edək ( $j=1, 2, 3$ ). Video-kameranın monitorunda  $A_1, A_2, A_3$  nöqtələri müəyyən  $B_1, B_2, B_3$  nöqtələrinə inikas olunur. Bu nöqtələrin  $O\xi\eta\zeta$  sisteminə nəzərən koordinatları uyğun olaraq  $(\xi_1, \eta_1, 0), (\xi_2, \eta_2, 0), (\xi_3, \eta_3, 0)$  olsun.

Göstərilmişdir ki,  $\Psi:(v, u) \rightarrow (\xi, \eta)$  biyektiv inikasını  $\Psi = \Psi_A^{-1} * \Psi_M$  kimi qurmaq olar. Burada  $\Psi_M:(v, u) \rightarrow (x, y)$  coğrafi koordinatların Merkator proyeksiyasına inikasıdır<sup>15</sup>:

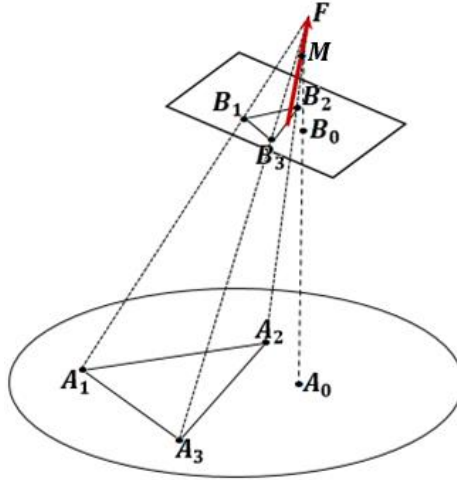
$$\left\{ \begin{array}{l} x = R \cdot v, \\ y = R \cdot \ln \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{u}{2} \right) \left( \frac{1 - \varepsilon \cdot \sin u}{1 + \varepsilon \cdot \sin u} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \right]. \end{array} \right.$$

$\Psi_A:(\xi, \eta) \rightarrow (x, y)$  Afinn çevirməsi isə belə yazıla bilər:

$$\begin{cases} a_{11}\xi + a_{12}\eta + b_1 = x, \\ a_{21}\xi + a_{22}\eta + b_2 = y. \end{cases}$$

---

<sup>15</sup> John, J.S. Map projections / J.S.John. – A Working Manual United States Government Printing Office, – Washington: – 1987, – 383 p.



**Şəkil 4. Yer səthində olan nöqtələrin monitor müstəvisində inikasının sxematik təsviri**

Məsələnin verilənləri əsasında  $\Psi_A$  inikasının əmsalları tapılır. Bundan sonra isə pilotsuz uçuş aparatının oriyentasiya bucaqlarından çıxış edərək, aparatın yeri ilə eyniləşdirilən kino kameranın  $F$  fokus nöqtəsinin Yer səthi üzərinə  $A_0$  proyeksiyasının coğrafi koordinatları hesablanır (Şəkil 4).

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [20]-də dərc olunmuşdur.

**Dördüncü fəslin 5-ci paraqrafında** nəzərdə tutulan marşrut üzrə ərazidəki maneələrdən yan keçməklə hərəkət etmək üçün trayektoriyanın təyin olunma məsələsi tədqiq olunur.

Yuxarıda deyildiyi kimi, pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan hərəkət marşrutu bu marşrut boyunca düyün nöqtələrinin daxil edilməsi ilə verilir. Bu nöqtələr bir qayda olaraq operator tərəfindən planşet üzərində xəritə fonunda daxil edilir. Lakin pilotsuz uçuş aparatının düyün nöqtələrindən keçməklə marşrut üzrə uçması maneələr və ərazinin relyefi səbəbindən mürəkkəbləşir. Ona görə də pilotsuz uçuş aparatının marşrut boyunca uçuşunun avtomatik idarə

olunması ilə bağlı optimal trayektoriyanın müəyyən olunması məsələsi meydana çıxır.

Relyefin nahamarlığı haqqında məlumat bir qayda olaraq müxtəlif formatlarda tərtib olunan relyef xəritələri ilə verilir<sup>16,17,18</sup>. Lakin belə xəritələrdən tələb olunan məlumatın əldə olunması və emalı əlavə işlərin görülməsini tələb edir. Ona görə də 2019-cu ildə A.B.Paşayevin məqaləsində relyef haqqında məlumatların fərqli verilmə üsulu təklif edilmişdir<sup>19</sup>. Həndəsi xəritə adlandırılan bu xəritənin özəlliyi ondan ibarətdir ki, ərazidə olan maneələr və relyef az sayda parametrlə xarakterizə olunan sadə həndəsi fiqurların köməyi ilə verilir, ona görə də trayektoriyanın müəyyənləşdirilməsi zamanı aparılan hesablar kifayət qədər sadələşir. Bu paraqrafda, maneələr  $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \leq r_i^2$ ,  $i = 1, 2, \dots$  bərabərsizlikləri ilə verilən ərazidən keçmək üçün təhlükəsiz optimal trayektoriyanın tapılması məsələsinin riyazi modeli qurulmuşdur.

Hesab edilir ki, pilotsuz uçuş aparatının uçuşu yer səthindən yuxarıda yerləşən müəyyən bir müstəvidən yuxarıda həyata keçirilir, yəni  $h_0 \leq z$ , burada  $h_0$  verilmiş ədəddir.

Tutaq ki, uçuş marşrutu  $M_k, (k=1, 2, \dots)$  düyün nöqtələri ardıcılığı şəklində, sonlu sayda relyef maneə elementləri  $(x - x_{B_i})^2 + (y - y_{B_i})^2 + (z - z_{B_i})^2 \leq r_{B_i}^2$  bərabərsizlikləri ilə verilib ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ). Burada  $x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i}, r_{B_i}$  – verilmiş ədədlərdir. Hərəkət marşrutunun hər bir  $M_{k-1}M_k$  düyün nöqtələrinə və bütün  $B_i$  nöqtələrinə ardıcıl olaraq aşağıdakı çevirmələri tətbiq edək:

---

<sup>16</sup> Ананьев, Ю.С. Геоинформационные системы / Ю.С.Ананьев. – Томск: Изд.ТПУ, – 2003. – 70 с..

<sup>17</sup> Кащенко, Н.А. Геоинформационные системы / Н.А.Кащенко, Е.В.Попов, А.В.Чечин – Н.Новгород: ННГАСУ, – 2012. – 130 с.

<sup>18</sup> SRTM DTED Format. Product Description: SRTM/PD-03/11/03 [Electronic resource] / – California, USA, 03.12.2003.

<sup>19</sup> Pashayev, A.B. A method for describing the terrain to determine the effective flight path of a drone / A.B.Pashayev, E.N.Sabziev, T.A.Alizada [et al.] // Informatics and Control Problems, – 2019. Vol.39, №2, – p. 67-73.



-  $A_\mu$  – koordinatların  $\mu$  vektoru qədər paralel sürüşdürülməsi;

-  $A_\alpha$  – parçaların uzunluğunun  $\alpha$  dəfə sıxılması (uzadılması);

-  $A_\varphi = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  –  $Oz$  oxu ətrafında  $\varphi$  bucağı qədər

döndərmədir; burada

$$\mu = (-x_{M_{k-1}}, -y_{M_{k-1}}, -z_{M_{k-1}}),$$

$$\alpha = \sqrt{(x_{M_k} - x_{M_{k-1}})^2 + (y_{M_k} - y_{M_{k-1}})^2 + (z_{M_k} - z_{M_{k-1}})^2},$$

$$\varphi = \arccos[\alpha^{-1}(x_{M_k} - x_{M_{k-1}})].$$

Onda  $M_{k-1}M_k$  parçası  $Ox$  koordinat oxunun  $[0, 1]$  parçasına inikas olunur. Tutaq ki, bu çevirmə zamanı  $M_k$  düyün nöqtəsi  $\tilde{M}_k = (0, 0, \tilde{z}_M)$  nöqtəsinə,  $B_i$  nöqtələri isə  $\tilde{B}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$  nöqtələrinə inikas olunur.  $r_{B_i}$  radiusunu uyğun olaraq  $r_i \equiv \alpha r_{B_i}$  ilə əvəz etməklə,  $[0, 1]$  intervalı boyunca optimal trayektoriyanın hesablanması üçün riyazi modeli qurmaq olar.

$y(x), z(x)$  ilə axtarılan trayektoriyayı işarə etsək,

$\int_0^1 \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y(x)\right)^2 + \left(\frac{d}{dx} z(x)\right)^2} dx$  funksionalının minimallığı

şərtindən,  $r_i^2 - (x - \tilde{x}_i)^2 - (y(x) - \tilde{y}_i)^2 - (z(x) - \tilde{z}_i)^2 \geq 0$  və  $h_0 \leq z(x)$  məhdudiyət şərtlərindən çıxış edərək tələb olunan trayektoriyayı təyin etmək üçün optimallaşdırma məsələsini formalaşdırmaq olar. Laqranj vuruqlarını (əmsallarını) daxil etməklə, sonra isə Kun-Takker teoremini tətbiq etməklə məsələ

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 y}{dx^2}(x) \frac{1 + \left(\frac{dz}{dx}(x)\right)^2}{2 \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}(x)\right)^2 + \left(\frac{dz}{dx}(x)\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{dy}{dx}(x) - y(x) \sum_{j=1}^n \lambda_j = \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{y}_j, \\ \frac{d^2 z}{dx^2}(x) \frac{1 + \left(\frac{dy}{dx}(x)\right)^2}{2 \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}(x)\right)^2 + \left(\frac{dz}{dx}(x)\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{dz}{dx}(x) - z(x) \sum_{j=1}^n \lambda_j = \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{z}_j. \end{array} \right.$$

diferensial tənliklər sistemi üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilmişdir. Uyğun sərhəd şərtləri belə yazılır:

$$\begin{cases} y(0) = 0, & z(0) = 0, \\ y(1) = 0, & z(1) = \tilde{z}_M. \end{cases}$$

Göründüyü kimi, alınmış məsələ qeyri-xətti məsələdir, onun ədədi həlli üçün daha mürəkkəb hesablama üsullarının tətbiq olunması tələb olunur<sup>20</sup>. Ona görə də praktikada çox zaman trayektoriyanın müəyyən olunması üçün sadələşdirilmiş alqoritmlərə üstünlük verilir. Belə trayektoriyalar "ən optimal" olmur, lakin istifadə baxımından daha rəşional hesab olunur. Ona görə də tədqiqat işində bir rəşional trayektoriyanın qurulması üçün alqoritm işlənilmişdir. Alqoritm, mahiyyət etibarını ilə kontur üzərinə çəkilmiş 2-ölçülü səthin 1-ölçülü analoqudur.

<sup>20</sup> Крайнов, А.Ю., Моисеева, К.М. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. – Томск: STT, 2016. – 44 С.

Bu paraqrafda şərh olunan tədqiqatlar [14]-də dərc olunmuşdur.

**Beşinci fəsil** pilotsuz uçuş aparatları qrupunun birgə uçuşunun idarə olunması üçün riyazi modelin və alqoritmin işlənilməsinə həsr olunmuşdur.

Məlumdur ki, çoxsaylı texnikanın kütləvi hücumunun qarşısını almaq çox çətindir. Ona görə də kütləvi hücum nəticəsində düşmənin xüsusi əhəmiyyətli hədəflərini məhv etmək üçün müqayisədə qat-qat ucuz başa gələn pilotsuz uçuş aparatlarının bir hissəsini qurban vermək əlverişli taktika hesab olunur. Bu baxımdan pilotsuz uçuş aparatları qrupunun fəaliyyətinin birgə idarə edilməsi zərurəti meydana gəlir. Bu problemin mənə kəsb edən əsas cəhəti ondan ibarətdir ki, birgə uçuşda iştirak edən hər bir pilotsuz uçuş aparatı ayrıca operator tərəfindən idarə edilməməlidir, bir operatorun tapşırıqları və ya komandaları əsasında qrupa daxil olan bütün pilotsuz uçuş aparatları səmərəli şəkildə idarə olunmalıdır.

Aydındır ki, pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşuna nail olmaq üçün yaradılması nəzərdə tutulan qərar qəbulətmə sistemi universal xarakterə malik olmalıdır, giriş məlumatlarının sayından asılı olmayaraq çıxışı birqiymətli olmalıdır və müxtəlif pilotsuz uçuş aparatlarında yerinə yetirilən proqram işinin nəticəsi bir–biri ilə konfliktə girməməlidir. Bundan çıxış edərək birgə uçuş həyata keçirən pilotsuz uçuş aparatları dəstəsini Sistemlər Sistemi (System of Systems)<sup>21</sup> kimi layihələndirmək təklif olunmuşdur. Sistemin yaradılması üçün istifadə olunacaq əsas fərziyyələr və prinsiplər aşağıdakı kimi verilir:

- bütün pilotsuz uçuş aparatları eyni uçuş xüsusiyyətlərinə malikdir, - pilotsuz uçuş aparatlarının maksimal sürəti, kruiz sürəti, məğbul sürətlənmə həddi (təcilalma qabiliyyəti) eyni hesab edilir;

- birgə uçuşda iştirak edən bütün pilotsuz uçuş aparatlarının sistem saati əməliyyat haqqında komanda verən operator pultunun

---

<sup>21</sup> Alonso, E., Karcianas, N., Hessami, A.G. Multi-agent systems: A new paradigm for Systems of Systems // Proceedings of the Eighth International Conference on Systems, – Chengdu, China: – January, – 2013, – p. 8-12.

saatı ilə sinxronlaşdırılıb, texniki qüsurlar üzündən müxtəlif aparatlarda zamanın bir birindən fərqlənməsi əhəmiyyətsiz dərəcədə azdır;

- pilotsuz uçuş aparatları tərəfindən alınan (ötürülən) məlumatlar vahid struktura malikdir: "aparatın nömrəsi", "məlumatın ötürülmə (alınma) anı", "uçuş sürəti", "cari koordinatları". Hər bir pilotsuz uçuş aparatı məlumat mübadiləsi zamanı yaxın ətrafındakı aparatlar barədə tərtib edilmiş vahid formata uyğun olaraq məlumatların tam dəstini alır;

- pilotsuz uçuş aparatının uçuş istiqaməti – əvvəlcədən müəyyən edilmiş trayektoriya boyunca yönəldilmiş əsas və təsadüfi yönəlmiş "köməkçi" istiqamətin məcmusundan ibarətdir. Köməkçi istiqamət pərlərin fırlanması zamanı mühərriklərin dartı qüvvələrində əmələ gələn fərqlərdən, qərar qəbuletmə sistemindəki, həmçinin pilotsuz uçuş aparatının icraedici orqanlarına əmrlərin ötürülməsi ilə bağlı meydana gələn gecikmələrdən, küləyin təsiri və digər bu kimi təsadüfi amillər səbəbindən əmələ gələn sapmalarla şərtlənir;

- pilotsuz uçuş aparatlarının hərəkətinin idarə olunması cari vəziyyətində onun sürətinin qiymət və istiqaməti ilə tənzimlənir;

Bu prinsiplərin realizə olunması üçün hər bir pilotsuz uçuş aparatının idarəedici parametri olaraq onun uçuş sürəti qəbul olunmuşdur. Məqsəd hər bir aparatlararası məlumat mübadiləsindən sonra elə hərəkət sürətinin seçilməsidir ki, bu onların ilə toqquşmadan təklükəsiz birgə uçuşda iştirakını təmin etsin.

Hər bir pilotsuz uçuş aparatının qərar qəbuletmə sistemi üçün baxılan aparatın birgə uçuş trayektoriyasının hansı hissəsində olmasından, həmçinin onun yaxın ətrafında uçan digər aparatların koordinatlarından və hərəkət sürətindən asılı olaraq onun tənzimlənən sürətinin hesablanma alqoritmi işlənmişdir.

Hesablamaları sadələşdirmək məqsədilə, əvvəlcə məsələnin bütün verilənləri baxılan aparatın ağırlıq mərkəzi ətrafında elə koordinat çevirməsinə məruz qalır ki, hərəkət istiqaməti aparatla bağlı  $Oxyz$  koordinat sistemində  $Oz$  oxu boyunca yönəlsin. Həmin istiqamətdə təhlükəsiz hərəkət zonasının hüdudları kəsik konus kimi təsvir olunur və aparatın həmin konusdan çıxmasını təmin edən

sürət vektoru hesablanır. Sonra tərs koordinat çevirməsinin tətbiqi ilə pilotsuz uçuş aparatının yerə nəzərən koordinat sistemində sürəti tapılır.

Bu fəsildə şərh olunan tədqiqatlar [18]-də dərc olunmuşdur.

**Sonda elmi məsləhətçim AMEA-nın akademiki, f.-r.e.d., professor T.A.Əliyevə işə yetirdiyi daimi diqqətə görə öz dərin minnətdarlığımı bildirirəm.**

## **İŞİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ**

Dissertasiya işində aşağıdakı əsas nəticələr alınıb.

1. TECTEP-Y3 tipli cihazla təmin olunmuş hərbi təyyarənin uçuş məlumatlarında olan yüklənmə təhriflərinin aradan qaldırılması məsələsi tədqiq olunmuş, normal koordinat sistemində nəzərən yüklənmələrin hesablanması üçün düstur təklif olunmuşdur.
2. Platformalı naviqasiya sisteminə malik hərbi təyyarənin uçuşun ilkin dövrünə aid qara qutuda qeydə alınan yüklənmələr, oriyentasiya bucaqları və sürət məlumatları əsasında məlumatların kompleksləşdirmə əmsallarının hesablanma alqoritmi verilmişdir.
3. Qara qutuda qeydə alınması zamanı itən uçuş məlumatların bərpası üçün neyron şəbəkəsi üsulu işlənmiş, şəbəkənin əmsallarını hesablamaq üçün ədədi hesabat alqoritmi verilmişdir.
4. Təyyarənin kurs bucağının filtrlənməsi, uçuş sürətinin Dopler ölçü cihazı məlumatlarına görə korreksiyası və tanqaj bucağının sazlanması üçün alqoritmlər təklif olunmuşdur.
5. Hərbi təyyarənin uçuş trayektoriyasının tənliyinin verilənlərin xətti kombinasiyası kimi kompleksləşdirilməsi ideyası irəli sürülmüşdür. Tənliklərin əmsallarının tapılması üçün Nyuton-Rafson iterasiya usuluna əsaslanan alqoritm təklif olunmuşdur.
6. Təyyarənin uçuş məlumatlarının kompleksləşdirilməsi məsələsinin riyazi modeli funksionalın minimallaşdırılması

məsələsi şəklində qurulmuşdur. Variasiya üsulunun tətbiqi ilə minimallaşdırma məsələsi 4-cü tərtib sabit əmsallı adi diferensial tənliklər üçün qoyulmuş sərhəd məsələsinə gətirilmişdir. Sərhəd məsələlərini həll etmək üçün klassik qovma üsulunun analoqu işlənmişdir.

7. Pilotsuz uçuş aparatlarının bortunda olan vericilərdən daxil olan məlumatların uçuş haqqında əlavə məlumatların köməyi ilə sazlanmasının həyata keçirilməsi zamanı müntəzəm yaxınlaşma meyarı əvəzinə  $L_2$  metrikasında yaxınlaşma meyarının tətbiq oluna bilməsi əsaslandırılmışdır.
8. Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının hərəkət trayektoriyası və fəza oriyentasiyası ilə ona təsir edən faktorlar və idarəedici parametrlər arasında asılılığı ifadə edən riyazi modelə söykənərək istismar zamanı kvadrokopterin müxtəlif qurğu və yüklərin əlavə edilməsi səbəbindən onun dəyişikliyə məruz qalmış bir sıra xarakteristik fiziki-texniki parametrlərinin uçuş ilkin dövrünə aid olan məlumatlar əsasında onlayın hesablanması və dəqiqləşdirilməsi üçün alqoritm işlənmişdir.
9. Kvadrokopter tipli pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya üzrə hərəkəti zamanı meydana şıxan sapmaların aradan qaldırılması ilə onun idarəedilmə məsələsi tədqiq olunmuş, uyğun idarənin hesablanması alqoritmi işlənmişdir.
10. Pilotsuz uçuş aparatının çəkdiyi video-foto şəkillərə görə onun yerinin təyin edilməsi məsələsinin həlli üçün coğrafi koordinatlarla kameranın monitor görüntüləri arasında biyektiv inikas qurulması təklif edilmiş və cari uçuş məkanının coğrafi koordinatlarının hesablanması məqsədilə iterativ hesablama alqoritmi işlənmişdir.
11. Ərazidə olan maneələr və nahamarlıqlar sfera tipli elementlər vasitəsi ilə verilən həndəsi xəritə əsasında nəzərdə tutulan marşrut boyunca hərəkət etmək üçün optimal trayektoriyanın müəyyən olunma məsələsinin riyazi modeli qurulmuşdur. Rasional trayektoriya anlayışı verilmiş, mümkün rasional trayektoriyalardan birini tapmaq üçün evristik ədədi hesablama alqoritmi təklif olunmuşdur.

12. Pilotsuz uçuş aparatların birgə uçuşunun bir operator tərəfindən effektiv şəkildə idarə edilmə mexanizmini yaratmaq üçün dronlar dəstəsi sistemlər sistemi kimi təsvir olunmuş, idarəetmə sisteminin əsas universal prinsiplər təklif olunmuşdur.
13. Birgə uçuşda iştirak edən hər bir pilotsuz uçuş aparatının nəzərdə tutulan trayektoriya boyunca hərəkətinin onun sürətinin tənzimlənməsilə idarə olunması üçün universal qərarqəbuletmə alqoritmi işlənmişdir. Baxılan hərəkət trayektoriyasının müxtəlif hissələrində dronun digərləri ilə toqquşmadan təklükəsiz birgə uçuşda iştirakını təmin edən sürət rejiminin hesabat düsturları verilmişdir. Pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşunun idarə edilmə modelinin sazlayıcı parametrlərinin müəyyənləşdirilmə prinsipləri işlənmişdir.

### **İşin əsas nəticələri aşağıdakı işlərdə nəşr olunub:**

1. Алгулиев, Р.М., Оруджев, Г.Г., Сабзиев, Э.Н. Об одном методе восстановления потерянной полетной информации // Труды III международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'04), – Москва, 28-30 янв., – 2004. с. 348–352.
2. Алгулиев, Р.М., Оруджев, Г.Г., Сабзиев, Э.Н. Определение коэффициентов комплексирования при идентификации траектории полета летательного аппарата // Труды IV международной конференции "Идентификация систем и задачи управления", – Москва, 25-28 янв., – 2005. с. 867-870.
3. Алгулиев, Р.М., Оруджев, Г.Г., Сабзиев, Э.Н. Комплексирование измерений для идентификации траектории полета летательного аппарата //– Москва: Журнал "Мехатроника, Автоматизация, Управление", – 2012. №2, с. 57-60.
4. Алгулиев, Р.М., Оруджев, Г.Г., Сабзиев, Э.Н. Восстановление потерянной полетной информации методом

- нейронных сетей // – Москва: Журнал "Мехатроника, автоматизация, управление", – 2013. №2, – с. 56-60.
5. Səbzıyev, E.N. Qara qutuda toplanmış uçuş məlumatlarında olan təhriflərin aradan qaldırılmasının bir üsulu // Qara qutuda toplanmış uçuş məlumatlarında olan təhriflərin aradan qaldırılmasının bir üsulu, – Bakı, 15 noyabr 2019, – 2019. – s. 18-20.
  6. Сабзиев Э.Н. Сведение задачи комплексирования полетных данных к краевой задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений // Сборник статей II Международной научно-практической конференции "Актуальные вопросы современной науки и образования", – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», – 23 янв., – 2020. – с. 12-15.
  7. Səbzıyev, E.N. Aerodroma qayıtmış təyyarənin uçuş məlumatları əsasında yüklənmə təhriflərinin aradan qaldırılmasının bir metodu // – Bakı: Hərbi icmal. – 2020. C.5, №1, – s. 3-11.
  8. Sabziev, E.N. Mathematical model of the fusion problem for flight data // 10th International Conference "Modern Directions of Development of the Information and Communication Technologies and Control Systems", – Xarkiv: – 9-10 April, – 2020, Vol.1, – p. 6.
  9. Pashayev A.B., Sabziev E.N. The substantiation of the application of the integral criterion in the calibration problem // Proceedings of the 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. – Baku: – 26-28 August, – 2020, Vol.1, p. 323-325.
  10. Sabziev, E.N. Algorithm of aircraft flight data processing in real-time // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, – 2020, V.108, – p. 213-221.
  11. Sabziev, E.N. Calculation of flight data fusion coefficients using Newton-Raphson iterations // Proceedings of 4th International Scientific and Practical Conference "Modeling,



- Control and Information Technologies" – Rivne, Ukraine: – 5-7 November, – 2020, – p. 100-103.
12. Sabziev, E.N. Mathematical model of adjustment of control parameters for drone flight along the planned flight path // Eastern European Science Journal, – 2020. V.62, №10, – p. 19-24.
  13. Pashayev, A.B., Sabziev, E.N. Refinement of the parameters of a mathematical model of quadcopter dynamics // Journal of Silesian University of Technology, – 2020, V.109, – p. 141-151.
  14. Sabziev, E.N. Algorithm for determining the trajectory of maneuvers along the planned route on a geometric map of the terrain // Informatics and Control Problems, – 2020. Vol.40, №2, – p. 43-49.
  15. Səbzıyev, E.N. Platformalı naviqasiya sistemininə malik təyyarənin uçuş məlumatlarının real vaxt rejimində kompleksləşdirilmə üsulu ilə emalı // – Bakı: Hərbi icmal, 2020. C.5, №2, – s. 5-13.
  16. Səbzıyev, E.N. Pilotsuz uçuş aparatlarının birgə uçuşunun həyata keçirilməsi ilə bağlı tədqiqatlara dair // Milli təhlükəsizlik və hərbi elmlər, – 2020. C.6, №3, – s. 34-40.
  17. Səbzıyev, E.N. Pilotsuz uçuş aparatlarının modelləşdirilmə məsələlərinə dair tədqiqatlar haqqında // Milli təhlükəsizlik və hərbi elmlər, – 2020. C.6, №4, – s. 7-17.
  18. Sabziev, E.N. A control algorithm for joint flight of a group of drones // Journal of Silesian University of Technology, – 2021, 110, – p. 157-167.
  19. Səbzıyev, E.N. Hərbi təyyarələrin uçuş parametrlərinin qeydiyyatı sistemində toplanan məlumatlarının emal problemləri haqqında // – Bakı: Hərbi icmal, – 2020. C.5, №3, s. 5-14.
  20. Sabziev, E.N. Determining the location of an unmanned aerial vehicle based on video camera images // Advanced Information Systems, – 2021. Vol.5, №1, – p.136-139.
  21. Səbzıyev, E.N. Qırıcı təyyarələrin qara qutusunda toplanan bəzi uçuş parametrlərinin ilkin emalı // – Bakı: Hərbi icmal, – 2021. C.6, №2, s. 9-14.

## **Müştərək müəlliflərlə yerinə yetirilən işlərdə müəllifin şəxsi rolu:**

[1, 2, 3, 4, 9, 13] işlərində müəllif məsələnin qoyuluşunun formalaşmasının müzakirəsində iştirak etmiş, həll üsulu təklif etmiş, və tədqiqat mexanizmini işləmişdir.

Dissertasiyanın müdafiəsi 14 yanvar 2021-ci il tarixində saat 14:00 -də Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası İdarəetmə Sistemləri İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.20 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az1141, Bakı şəhəri, B. Vahabzadə küç. 68.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası İdarəetmə Sistemləri İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları AMEA İdarəetmə Sistemləri İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 7 dekabr 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 26.11.2021  
Kağızın formatı: 60x84 1/16  
Həcm: 90000  
Tiraj: 100