

# ИБРАЕВ АЙДОС САЯТУЛЫ

## ИНЕРЦИАЛДЫҚ-СПУТНИКТИК НАВИГАЦИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУ ТӘСІЛДЕРІ МЕН АЛГОРИТМДЕРІН ЖАСАУ

### АҢДАТПА

«6D074600 – Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша Философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену диссертациясы

**Жұмыстың өзектілігі.** Қазіргі заманда Ғаламдық навигациялық жерсеріктік жүйелер (ҒНСЖ) азаматтық және әскери авиация, теңіз және жер үсті навигациясы немесе геоматика сияқты көптеген салаларда шешуші рөл атқарады. GPS-тен алынған ақпарат, қозғалып бара жатқан көліктің төңіректегі орналасуын нақты уақыт режимінде жеткілікті дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретіндіктен, және дәлдігі уақытқа тәуелді нашарламайтын болғандықтан, автономды көліктер үшін навигациялық ақпараттың негізгі көзі болып табылады.

GPS – 24 серіктен тұратын серіктер шоғырына сүйеніп, нысанның Жер бетіндегі нақты орнын кез келген жерде, кез келген уақыт мезетінде, және кез келген ауа-райында анықтауға арналған жүйе. GPS-қабылдағышқа нысанның үшөлшемді кеңістіктегі (3D) нақты орналасуын (x, y, z) 20 метрге дейінгі қателікпен анықтау үшін, кем дегенде 4 навигациялық серіктің ақпараты қажет. Сонымен қатар, дифференциалдық коррекция (DGPS – Differential GPS) деп аталатын тәртіпте жұмыс істеп, кем дегенде 5 серіктің ақпаратының көмегімен орналасуды анықтау дәлдігін 2 сантиметрден төмен қателікке дейін жақсартуға болады. Алайда, GPS-ке негізделген көлік навигациясының бір аса маңызды кемшілігі бар: Ағаштар, тоннель, биік ғимараттар, арнайы сигнал тұншықтырғыштары секілді әртүрлі кедергілер сигналдың белгісіз уақыт аралығында үзілуіне, яғни навигациялық ақпараттың жоғалуына әкеп соқтыруы мүмкін. Жүргізушінің басқаруынсыз өзі жүретін көліктер үшін (біздің тәжірибе осындай көліктің бірінде жүзеге асты), бұндай жағдай басқару жүйесінің уақытша істен шығуымен пара-пар. Бұл мәселенің оптималды шешімі – GPS ақпаратын инерциалдық навигация жүйесімен (ИНЖ) интегралдау болып табылады.

Инерциалдық навигация жүйелері (ИНЖ) Жерсеріктік навигация жүйелерінен (СНЖ) ерте пайда болып, теңіз және әуе кемелерінің навигациясында, геодезияда, ғарыштық және зымырандық техникада кең таралды. ИНЖ-де көліктің кеңістіктегі орналасуы инерциалдық өлшеу блоктары (IMU – Inertial measurement unit) арқылы жүйеге әсер ететін сызықтық үдеу мен бұрыштық жылдамдықты өлшеу арқылы есептеледі. IMU – бұрыштық жылдамдықтар датчиктері (гироскоптар) мен акселерометрлерден тұратын өлшеу жүйесі болып табылады. IMU және одомердің көмегімен автокөліктің бастапқы орнын білсек, оның кез келген

уақыт мезетіндегі орнын сыртқы сигналдардың көмегінсіз анықтауға болады. ИНЖ қозғалып бара жатқан нысанның орнын қосымша басқа құрылғылардан алынған навигациялық мәліметтің көмегінсіз анықтай алғанымен, олар уақыт өткен сайын жинала беретін кездейсоқ жүйелік қателіктерге ұрымтал келеді. Бұндай қателіктер координаттарды анықтау кезінде соңғы нәтиженің шынайы мәннен өте қатты ауытқып кетуіне әкеп соғады. Сол себепті, әлемдік практикада навигация нәтижелерін жақсарту мақсатында ИНЖ басқа навигация жүйелерімен интегралданады.

Интегралданған инерциалды-спутниктік навигация жүйелері (ИНЖ/СНЖ) қазіргі кездегі барлық навигация жүйелерінің ішіндегі ең перспективалы классы болып табылады. Олар ИНЖ және GPS-тің әрқайсысын жеке дара қолданғандағы артықшылықтарын біріктіріп, кемшіліктерінен құтылуға мүмкіндік береді. ИНЖ/СНЖ кешенді жүйесінің жәй СНЖ-нен артықшылықтары: сигналдың үзіліссіздігі (GPS сигнал жоқ кезде жұмыс істей береді), нысанның бұрыштық ориентациясын есептеу мүмкіндігі, навигациялық мәліметті қабылдау жиілігінің жоғары болуы болып табылады. Интегралданған жүйелерде микроэлектромеханикалық (МЭМЖ) датчиктер негізінде құрылған арзан, жеңіл және шағын ИНЖ қолдануға мүмкіндік туады. Мұндай ИНЖ-лерді автономды пайдалану, МЭМЖ гироскоптар мен акселерометрлердің жүйелік сипаттамаларының тұрақсыз болуына байланысты, навигациялық мәліметтерді анықтағанда қателіктің тез жиналуына әкеп соқтырып, көптеген қиындықтар туғызады.

Бұл жұмыста GPS-тің жылдамдық және орналасу өлшеулерін ИНЖ мәліметімен салыстыра отырып, инерциалдық датчиктердің қателіктерін бағалауға мүмкіндік беретін ИНЖ-лерін СНЖ арқылы Калман фильтрациясы деп аталатын арнайы математикалық аппараттың көмегімен интегралдаудың нұсқалары сипатталады.

Дәлдікке қойылатын талаптан басқа, қазіргі кезде навигациялық жүйелерге навигациялық қамтамасыздандырудың біртұтастығы, қолжетімділігі және үзіліссіздігі сияқты параметрлеріне талаптар қойылады. Біртұтастықтың көрсеткіші – қажетті шекара арасынан жүйенің жұмыс істеу сипаттамаларының (ең алдымен дәлдігінің) шығысын және берілген уақыт интервалы арасында ол туралы навигациялық хабарламаны анықтау мүмкіндігі болып табылады. Қолжетімділігі – тұтынушының берілген уақыт мезетінде талап етілген дәлдікпен рас ақпарат алу ықтималдығымен анықталады. Үзіліссіздігі – жүйенің берілген уақыт интервалында рас ақпаратпен қамтамасыз етуімен сипатталады. Растығы, өз кезегінде навигациялық жүйенің белгілі уақыт аралығында, қандай да бір аймақта өз сипаттамаларын берілген ықтималдықпен қажетті шекарада ұстап тұру қабілеті болып анықталады.

Берілген дәлдік деңгейін және жоғарыда көрсетілген сапалық көрсеткіштерді қамтамасыз ету үшін заманауи маневрлі техниканың навигация жүйелеріне ерекше талаптар қойылады. Қазіргі замандағы навигацияның борттық жүйелеріне ең алдымен инерциалды (ИНЖ) және Жерсеріктік навигация жүйелерін (СНЖ) жатқызу керек. Инерциалдық

навигация жүйелері Ірі ұшақтарда баяғыдан бері қолданылып келеді. Жоғары дәлдікті ИНЖ-лердің азаматтық ұшақтар үшін авиациялық стандарт талап ететін дәлдігі – бір сағат ұшқанда (1,8 км/сағ) координат бойынша 1 теңіз милі болып табылады. Сонымен қатар, координат анықтау дәлдігі бір сағатта бірнеше жүз метрден аспайтын әлдеқайда дәлірек жүйелердің жасалуы белгілі. Жерсеріктік навигация жүйелері авиациялық қосымшаларда соңғы онжылдықта ғана пайдаланыла бастады да, тез арада борттық құрылғылардың штаттық құрамынан орнын тапты. СНЖ қолдану тәжірибесі, оның көптеген жақсы қасиеттеріне қарамастан, қазіргі кездегі жоғарыда көрсетілген талаптарды толық қанағаттандыра алмайтындығын көрсетті.

СНЖ және ИНЖ интеграциясының төрт негізгі деңгейі белгілі:

- Бөлек жүйелер (Separate Systems). Бұл тәсілде, нысан координатасының және жылдамдығының автономды спутниктік навигациялық шешімдері инерциалдық жүйенің сәйкес ақпаратының жай ғана алмастырады.

- Әлсіз байланысқан жүйелер (Loosely Coupled Systems). Бұл тәсілде, ИНЖ шешімдерін СНЖ позиция және жылдамдық бойынша автономдық шешімдері арқылы коррекциялау есебі шығарылады.

- Тығыз интегралданған жүйелер (Tightly Coupled Systems). Интеграциялаудың мұндай нұсқасында СНЖ сигналдарын қабылдағыштың әуелгі ақпараты (кодтық псевдоқашықтықтар, доплерлік псевдожылдамдықтар, фазалық өлшеулер) ИНЖ үшін коррекциялаушы (түзетуші) өлшеулер ретінде пайдаланылады.

- Терең интегралдау (Deep Integration), тығыз интеграция нұсқасына қосымша, СНЖ корреляторларына кері байланыс орнатылады. Сөйтіп, сезімтал элементтері инерциалдық датчиктер – акселерометрлер, гироскоптар, т. б. қоса СНЖ корреляторлары болатын жаңа аппараттық кешен құрады.

Интеграцияның бірінші түрі қазіргі кезде сирек пайдаланылады. Екінші түрі әжептәуір зерттелген, инерциалды және Жерсеріктік навигация интеграциясының стандартты түріне айналды. Үшінші нұсқа – ИНЖ және СНЖ тығыз байланысқан интеграциясы қазіргі кезде ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстар деңгейінде енді-енді шұғыл зерттеліп, іске асырылып келе жатқан жаңа бағыт. Ең соңғы нұсқа – терең интеграция, тығыз интеграцияланған комплекстердің заңды түрде дамуы болып табылады, ең аз зерттелген өте жаңа бағыт.

Зерттеліп отырған есеп белгілі, оған көптеген жарияланымдар арналған. Дегенмен, ол жарияланымдарда алгоритмдерді жүзеге асыру үшін маңызды математикалық модельдер мен алгоритм бөліктері сипатталмай, интеграцияланған жүйелер жұмыс жасауының соңғы нәтижелері ғана келтіріледі. Бұған қоса, бағдарламалық кешен жазуға жарамды нақты алгоритмдік сызба сипатталған дереккөздер іс жүзінде жоқ. Бұған себеп – мұндай бағдарламалық кешеннің не коммерциялық құпия, немесе бағдарламалық кешен әзірлеушісінің зияткерлік меншігі болып табылуы болып табылады.

Осылайша, бүгінгі таңда кешенді инерциалдық-жерсеріктік навигация жүйелерінің дәлдігін арттыру тәсілдерін жетілдіру және жаңа түрлерін жасап шығару – өзекті ғылыми-техникалық мәселе екені күмән тудырмайды.

Тығыз байланысқан және терең интеграцияланған жүйелерді құруға Жерсеріктік навигация жүйесінің ішкі құрылымына қолжетімділік қажет болғандықтан, бұл жұмыста Калман фильтрі негізінде ИНЖ/СНЖ, ИНЖ/Одометрия, ИНЖ/СНЖ/Одометрия, интеграциясын жасау үшін әлсіз байланысқан интеграция тәсілі таңдалды.

**Зерттеудің мақсаты** – толықтай автономды, дәлдігі жоғары, жерсеріктік навигация ақпаратына қолжетімсіз жағдайда жұмыс істеуін тоқтатпайтын, салыстырмалы түрде арзан инерциалдық-спутниктік навигация жүйесін жасап, оның дәлдігін арттыру әдістері мен алгоритмдерін зерттеу.

**Зерттеудің міндеттері:**

- Инерциалдық датчиктердің қателіктерін компенсациялау тәсілдері
- ИНЖ математикалық моделін жасау
- Одометрияның көмегімен көліктің координаттарын анықтау
- ИНЖ/Одометрия және ИНЖ/СНЖ/Одометрия гибридік жүйелерінің математикалық бағдарламалық кешенін жасау

**Зерттеу нысаны.** Диссертациялық жұмыстың зерттеу нысаны – арзан ГНСЖ қабылдағыш, арзан үшөсті МЭМЖ акселерометр мен гироскоп және одометрден құралған жүйе болып табылады.

**Зерттеу пәні.** Инерциалдық және Жерсеріктік навигация жүйелерін интеграциялау алгоритмдері, ИНЖ дәлдігін арттыру алгоритмдері.

**Зерттеу әдістері.** Зерттеулер үшін математикалық талдау, математикалық статистика, сызықтық алгебра және көп өлшемді геометрия әдістері, оптималды фильтрация теориясы, қолданбалы программалау әдістері қолданылды. Міндетті қою үшін қатты дене қозғалысы теориясының математикалық аппараты, жерсеріктік және инерциалдық навигация теориясының математикалық аппараты, сондай-ақ компьютерлік үлгілеу пайдаланылды.

**Қорғауға шығарылатын негізгі мәселелер.** Зерттеу нәтижелері бойынша төмендегідей мәселелер шешілді:

- ИНЖ әр түрлі қателіктерін анықтап, олардан құтылуға арналған инерциалдық датчиктерді алты позициялық (SPM) және тоғыз позициялық (MPM) калибрациялау тәсілдерінің бағдарламалық-математикалық кешені жасалып, сынақтан өткізілді;

- Үшөсті акселерометр және гироскоптан тұратын ИНЖ көмегімен нысанның координаталарын анықтау бағдарламалық-математикалық кешені жасалды;

- Одометрияны пайдаланып көлік локализациясын анықтау бағдарламалық-математикалық кешені жасалды;

- Өртүрлі датчиктердің навигациялық мәліметін Калман фильтрін қолданып әлсіз байланысқан алгоритм бойынша интеграциялау алгоритмдері: ИНЖ/Одометрия, ИНЖ/СНЖ/Одометрия жасалды;

- Жасалған барлық әдістер мен алгоритмдер нақтылы жүргізушісіз жүретін автокөліктерде орнатылған шынайы датчиктерді қолданып өткізілген тәжірибелік өлшеулер негізінде сынақтан өткізілді.

**Жүргізілген зерттеулердің нақтылығы мен сипаты.** Математикалық аппараттың, инерциалдық және жерсеріктік навигация теориясының негізгі ережелерінің қолданылу дұрыстығымен; эксперименттердің нақтылы жүргізушісіз интеллектуалды көлік құрылғыларының көмегімен алынған шынайы мәліметтер базасы арқылы дұрыс қойылуымен және оларды дұрыс өңдеумен; теориялық зерттеулердің және экспериментальді берілгендердің сапалық және сандық сәйкестігімен; зерттеу нәтижелерінің практикада қолданылуымен қамтамасыз етіледі.

#### **Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы.**

Теориялық тұрғыдан қарағанда, гибридті навигациялық жүйелер жасаудың ғылыми-әдістемелік қамтамасыздандыруы – әдістер мен тәсілдер, оларды қолдану тәртібі, интерпретациясы және нәтижелерге қол жеткізу. Бұндай әдістеме Қазақстанда бұрын жасалмаған және комплексті навигациялық жүйелер жасап шығарушыларға нұсқаулық бола алады.

Жасалған гибридті жүйе әртүрлі қозғалатын нысандардың орын ауыстыруын мониторингілеу, жерүстілік, кеме және аэроғарыштық құралдардың жоғары дәлдікті навигациясы, ҒНСЖ сигналдарына қол жетімсіз жағдайдағы көлік навигациясы, ракеталарды бағдарлау және т.б. әскери және тұрмыстық навигацияның әртүрлі салаларында қолданысқа ие бола алады. Сонымен қатар, мұндай жүйелер нысандарды тану және лазерлік дальнометриямен бірге кейінгі кезде Google, Yandex, Tesla, т.б сияқты компаниялар белсенді жасап шығарып жатқан жүргізушісіз автомобильдер жасаудағы ең негізгі борттық жүйелердің бірі болып табылады.

**Автордың жеке қосқан үлесі.** Диссертацияда берілген барлық нәтижелер авторға тиесілі немесе оның тікелей қатысуымен алынды. Тең авторлар мен ғылыми жетекшілердің қатысуы есептің қойылуы және алынған нәтижелерді талқылаумен байланысты.

#### **Зерттеу нәтижелерінің апробациясы.**

Диссертация материалдары бойынша барлығы 14 басылым, оның ішінде 1 – Scopus базасында индекстелетін журналда, ҚР БҒМ ККСОН ұсынған журналдарда 3 жұмыс жарияланды. Жұмыстың тақырыбы бойынша алынған нәтижелер бойынша «Технические науки - от теории к практике.» (Новосибирск, 2017, № 5(65)) LXX халқаралық ғылыми-практикалық конференциясы материалдары бойынша мақалалар жинағында екі мақала, Қ.И. Сәтпаев атындағы ҚазҰТУ-ң 80 жылдығына арналған ««Қазақстан-2050» стратегиясын іске асырудағы жас ғалымдардың орны мен рөлі» халқаралық Сәтпаев оқулары конференциясының еңбектер жинағында (Алматы, 2014, III том), Scopus базасы бойынша индекстелетін «Indian journal of science and technology» (Индия, 2016) жарық көрді.

## **Жұмыстың құрылымы мен көлемі**

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, қолданылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады.

1-тарауда әртүрлі позициялау жүйелері және басқару тұжырымдамаларына сипаттама беріліп, оларды гибридті жүйеде қолданудағы артықшылықтары мен кемшіліктеріне шолу жасалды. Инерциалдық навигация жүйесінің теңдеулері көрсетілді және сол теңдеулер негізіндегі қателіктер теңдеулері алынды. Үшесті акселерометр мен гироскоптардан алынған мәлімет бойынша әртүрлі санақ жүйелеріне көшу матрицаларын және интегралдау әдістерін пайдаланып көліктің орнын және бағдарын анықтау есебінің жаңа алгоритмдік схемасы ұсынылды. Сонымен қатар, инерциалдық навигация дәлдігін арттыру үшін одометрияны пайдалану ұсынылды. Автомобильдің екі дөңгелегінде орналасқан одометрлерден алынған мәлімет бойынша көліктің орны мен бағдарын жазықтықта анықтау модельдері және бұл модельге қойылатын шектеулер келтірілді. Қос дөңгелекті және төрт дөңгелекті көлік модельдері үшін одометрия теңдеулері көрсетілді.

Екінші тарауда ИНЖ/СНЖ дәлдігін арттырудың әртүрлі әдістері талқыланды. Калман фильтрі туралы жалпы мәлімет беріліп, ИНЖ/СНЖ интеграциясының түрлеріне шолу жасалып, әлсіз байланысқан интеграция әдісі таңдалып алынды. Әртүрлі кедергілердің әсерінен СНЖ мәліметі жоғалған жағдай үшін ИНЖ/Одометрия гибридті жүйесінің алгоритмі ұсынылды. Жүзеге асырылатын Калман фильтрінің моделі сипатталынып, параметрлеріне сипаттама берілді. GPS және инерциалдық датчиктер мәліметтерінің арасындағы уақыт бойынша синхронизациялау әдістемесі түсіндірілді. Сондай-ақ, қолданылатын фильтрлерді инициализациялау, олардың параметрлерін баптау деген сияқты кейбір аспектілер қарастырылды. Инерциалдық навигация модулінің жүйелік қателіктерінің түрлері егжей-тегжейлі талқыланып, олардың ішіндегі ең маңыздылары – акселерометр мен гироскоптың нөлдік ауытқулары, масштабтық коэффициенттері және өстік сәйкессіздік қателіктерін компенсациялауға арналған алты позициялық және тоғыз позициялық тәсілмен калибрациялау әдістемесі жасалды және арзан МЭМЖ датчиктердің көмегімен сынақтан өткізілді.

3-тарауда тәжірибелік сынақ жүргізу барысы, одан алынған нәтижелер сипатталып, талдау жүргізілді. Алдымен, әр датчик мәліметтері үшін алдын ала өңдеу жүргізілді: GPS мәліметінің дәлдігін анықталды; ИНЖ мәліметіне статикалық калибрация жүргізу тәсілдері арқылы нөлдік ығысу, масштабтық коэффициент және өстік сәйкессіздік сияқты жүйелік қателіктеріне компенсация жасалды. Одан кейін, СНЖ/ИНЖ/Одометрия, ИНЖ/Одометрия интеграциясының нәтижелері көрсетіліп, тірек (эталондық) траекторияға қатысты қателіктеріне талдау жасалынады. Тәжірибелер INRIA (Париж-Рокенкур, Франция) ғылыми зерттеу орталығының Cybus интеллектуалды автокөлігі арқылы жүзеге асырылды, сондай-ақ KIT (Karlsruhe, Germany) институтының автоматтандырылған көліктерінің

датчиктерінен алынған мәліметтер базасы қолданылды. Бағдарламалық кешен Matlab және Simulink пакеттері арқылы жүзеге асырылды.

Қорытынды бөлімде зерттеу нәтижелері қорытындыланып, бұл тақырыпта әрі қарай жасауға болатын жұмыстарға нұсқаулықтар берілді.

Қосымша А – Инерциалдық және Жерсеріктік навигация жүйелерін байланыстыруда, инерциалдық навигация механизация теңдеулері мен алгоритмінде қолданылған санақ жүйелерін сипаттап, олардың арасындағы көшу матрицаларын өрнектеуге арналған өте маңызды бөлім.