

# İnersial Naviqasiya Sistemlərində Sensor Sıqnallarının Zaman Sıraları Şəklində Toplanması və Texnoloji Suverenlik Kontekstində Texniki və Riyazi Əsaslandırılması

Nigar Məmmədova

Dövlət Təhlükəsizliyi Xidmətinin Heydər Əliyev adına Akademiyası,  
İdarəetmə Sistemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
nigar.mammadova2025@gmail.com

**Xülasə**— Məqalədə inersial naviqasiya sistemlərində (İNS) istifadə olunan akselerometr və girooskop sensorlarından əldə edilən ölçmə siqnallarının diskret zaman oxu üzrə zaman sıraları formasında toplanmasının texniki və riyazi əsasları araşdırılmışdır. MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) əsaslı sensorların sabit nümunələmə tezliyi ilə işləməsi, ölçmələrin vahid zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılması və vahid ölçmə vektoru şəklində təqdim edilməsi modelləşdirilmiş laboratoriya nümunələri əsasında təhlil olunmuşdur. Sensor siqnallarının fiziki uyğunluğu, səs-küy təsiri və statistik xarakteristikaları zaman sıraları modeli ilə qiymətləndirilmişdir. Nəticələr göstərir ki, bu yanaşma filtrasiya, inteqrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmləri üçün etibarlı riyazi baza formalaşdırır və peyk sistemlərindən asılı olmayan naviqasiya həlləri vasitəsilə avtonom sistemlərdə texnoloji suverenliyin təmininə töhfə verir.

**Açar sözlər**— *İnersial Naviqasiya Sistemi; zaman sıraları; akselerometr; girooskop; diskret zaman oxu; nümunələmə tezliyi; sensor sinxronlaşdırılması; statistik analiz; texnoloji suverenlik.*

## I. GİRİŞ

İnersial Naviqasiya Sistemləri dəqiq və etibarlı yerləşdirmə və hərəkət məlumatlarını təmin etməklə müxtəlif sənaye sahələrində mühüm rol oynayır. Beləki, İnersial Naviqasiya Sistemləri (İNS) xarici istinadlara ehtiyac olmadan hərəkətdə olan obyektin mövqeyini, sürətini və oriyentasiyasını təyin etmək üçün sensorların birləşməsindən istifadə edən mürəkkəb texnologiyalardır [1,2]. Onlar hərəkət və fırlanma dəyişikliklərini ölçən sensorlardan istifadə edərək, xarici siqnallardan (məsələn, GPS və s.) asılı olmayaraq fəaliyyət göstərir [3] və xarici ədəbiyyatın əlçatmaz və ya etibarsız ola biləcəyi aviasiya (məsələn PUA və s), sualtı qayıqlar, kosmik tədqiqatlar və hətta quru nəqliyyat vasitələri kimi müxtəlif sahələrdə geniş istifadə olunur [4]. Sözü gedən naviqasiya sistemləri əsasən aviasiyada avtopilot sistemləri və naviqasiya üçün istifadə olunur, uçuş aparatının mövqeyi və trayektoriyası haqqında kritik məlumatları təmin edir və pilotlara GPS-in etibarsız ola biləcəyi müxtəlif hava şəraiti və coğrafi problemlər arasında naviqasiya etməyə kömək edir, həmçinin, pilotsuz uçuş aparatlarında sabit uçuş üçün bu sistemlərə çox etibar edilir.

İnersial Naviqasiya Sistemləri (İNS) müasir avtonom və yarı-avtonom texnoloji platformaların əsas funksional komponentlərindən biridir. Xüsusilə, robot texnologiyaları, müdafiə təyinatlı sistemlər və s. üçün İNS-in peyk əsaslı naviqasiya sistemlərindən asılı olmadan işləməsi texnoloji suverenliyin təminində həlledici əhəmiyyət daşıyır [5].

İNS-in əsasını təşkil edən akselerometr və girooskop sensorlarından alınan ölçmələrin düzgün toplanması, sinxronlaşdırılması və emalı naviqasiya dəqiqliyinin əsas müəyyənedicisidir. Bu baxımdan sensor siqnallarının zaman sıraları formasında formalaşdırılması yalnız texniki məsələ deyil, həm də riyazi modelləşdirmə və tətbiqi alqoritmlərin düzgün işləməsi üçün fundamental şərtidir [6]. İNS-in dəqiqliyi birbaşa olaraq akselerometr və girooskop sensorlarından alınan ölçmələrin düzgün toplanması, sinxronlaşdırılması və riyazi emalından asılıdır. Sensor siqnallarının zaman oxu üzrə ardıcıl və strukturlaşdırılmış formada təqdim edilməsi sonrakı filtrasiya, inteqrasiya və vəziyyət qiymətləndirmə alqoritmlərinin etibarlılığını təmin edir [7]. Bu sensorlardan gələn siqnallar adətən mövqe, sürət və hərəkətin izlənməsi kimi müəyyən daşıyıcılığa malik xüsusiyyətləri əldə etmək üçün müxtəlif alqoritmlərdən istifadə etməklə işlənən zaman sıraları şəklində olur.

Qeyd etdiyimiz kimi, bir çox tətbiq sahələri ilə yanaşı İnersial Naviqasiya sistemləri pilotsuz uçuş aparatlarında (PUA-larda) çox vacib rol oynayır. Onlar PUA-larda tarazlığı və oriyentasiyanı qorumaq üçün girooskop və akselerometrlərdən istifadə edərək, müşahidə, hərbi, kənd təsərrüfatı və çatdırılma xidmətləri kimi real vaxt rejimində mövqe məlumatlarının vacib olduğu tətbiqlər üçün xüsusilə vacibdir. Bu sistemlər PUA-nın istiqamətini, qeyri-adekvat hərəkətinin izlənməsini, monitorinqini izləmək üçün istifadə olunur. PUA-larda İNS-in əsas üstünlüyü onun peyk naviqasiya sistemlərindən (GPS) asılı olmadan işləyə bilməsidir. Məsələn, GPS siqnalı itdikdə və ya müdaxilə olduqda, İNS uçuşu davam etdirmək üçün etibarlı alternativ təmin edə bilər [8]. Bu sistemlər PUA-ların avtomatik olaraq müəyyən trayektoriyalara uyğun uçuşunu təmin etmək, eniş və qalxış zamanı sabitliyi qorumaq və zəruri hallarda sürətli manevrlər etmək üçün geniş istifadə olunur. Bundan əlavə, İNS-lər PUA-

lara naviqasiya, hədəf, öz mövqelərini təyin etməyə və uçuşun ortasında lazımı düzəlişlər etməyə imkan verir [9]. Bu dəqiqlik, xüsusilə düşmən mühitlərdə hədəflənmə və missiyanın müvəffəqiyyəti üçün çox vacibdir.

Bu məqalədə inersial naviqasiya sistemlərində sensor siqnallarının diskret zaman sıraları şəklində təqdim edilməsinin filtrasiya, inteqrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmləri üçün zəruri riyazi şərt olduğu göstərilmişdir. Akselerometr və girooskop ölçmələrinin vahid zaman oxu üzrə sinxronlaşdırılması, ölçmə səs-küyünün statistik xarakteristikalarının (orta qiymət və dispersiya) təhlili ilə birlikdə əsaslandırılmışdır. Təklif edilən model texnoloji suverenlik kontekstində daxili sensor məlumatlarına əsaslanan naviqasiya sistemlərinin qurulmasına imkan verir.

## II. PROBLEMİN QOYULUŞU VƏ MƏQSƏD

### A. Problem

Müasir inersial naviqasiya sistemlərində (İNS) akselerometr və girooskop sensorlarından əldə olunan ölçmə siqnalları naviqasiya dəqiqliyinin əsas mənbəyini təşkil edir. Lakin bu ölçmələrin zaman oxu üzrə düzgün strukturlaşdırılmaması, sensorlararası sinxronlaşdırma xətalari, eləcə də ölçmə səs-küyünün riyazi baxımdan nəzərə alınmaması filtrasiya, inteqrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmlərinin qeyri-stabil və etibarsız işləməsinə səbəb olur. Xüsusilə peyk naviqasiya sistemlərinə çıxışın məhdud olduğu və ya tam itirildiyi şəraitlərdə bu problem pilotsuz uçuş aparatları və müdafiə təyinatlı avtonom platformalar üçün kritik xarakter daşıyır. Buna görə də sensor siqnallarının diskret zaman sıraları şəklində korrekt toplanması və riyazi əsaslandırılması aktual elmi–texniki problem kimi çıxış edir.

### B. Tədqiqatın məqsədi

Bu tədqiqatın əsas məqsədi MEMS əsaslı akselerometr və girooskop sensorlarından alınan ölçmə siqnallarının sabit nümunələmə tezliyi ilə diskret zaman oxu üzrə toplanmasının, vahid zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılmasının və vahid ölçmə vektoru şəklində formalaşdırılmasının texniki və riyazi əsaslarını nümayiş etdirməkdir. Məqalədə real laboratoriya şəraitini modelləşdirən nümunələr əsasında sensor ölçmələrinin fiziki reallığa uyğunluğu, ölçmə səs-küyü və statistik xarakteristikaları qiymətləndirilir. Nəticədə peyk naviqasiya sistemlərindən asılı olmayan, daxili sensor məlumatlarına əsaslanan naviqasiya həllərinin qurulması üçün etibarlı metodoloji baza təqdim olunur.

### C. Tədqiqat üsulları

Tədqiqat çərçivəsində inersial naviqasiya sistemi 3 oxlu akselerometr və 3 oxlu girokopdan ibarət MEMS əsaslı sensor konfigurasiyası əsasında modelləşdirilmişdir. Sensor ölçmələri sabit nümunələmə tezliyi (100 Hz) ilə aparılaraq diskret zaman oxu  $t_k = k \times \Delta t$ , əsasında formalaşdırılmışdır. Akselerometr siqnalları volt ölçülərindən fiziki vahidlərə çevrilmiş, girokop ölçmələri isə zamanla yığılan sistemə sürüşmə (drift) və səs-küy komponentlərini nəzərə alan riyazi model əsasında təhlil edilmişdir [10]. Bütün sensor kanalları vahid zaman indeksi

üzrə sinxronlaşdırılaraq vahid ölçmə vektoru  $z(t_k)$  yaradılmış, ölçmə ardıcılıqları üçün orta qiymət və dispersiya hesablanmaqla sensor səs-küyü statistik olaraq qiymətləndirilmişdir. Əldə olunan nəticələr İNS üçün sonrakı filtrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmlərinin riyazi baxımdan korrekt tətbiqini təmin edən baza kimi təhlil edilmişdir.

## III. METODOLOJİ ƏSASLAR VƏ RİYAZİ MODEL

### A. Sistem konfigurasiyası və sınaq ssenarisi

Tədqiqat çərçivəsində inersial naviqasiya sistemi (İNS) MEMS əsaslı sensor texnologiyası üzərində qurulmuş və aşağıdakı əsas komponentlərdən ibarət konfigurasiya əsasında modelləşdirilmişdir:

- üç oxlu akselerometr,
- üç oxlu girokop.

Sensorlar sərt və dəyişməz platformaya sabitlənmiş, ölçmələr zamanı obyekt əsasən statik, bəzi zaman anlarında isə zəif dinamik rejimdə olmuşdur. Bu sınaq ssenarisi real uçuş və ya hərəkət platformalarının başlanğıc və stabil iş rejimlərini modelləşdirməyə imkan verir. Seçilmiş yanaşma İNS sensorlarının real tətbiqlərdə müşahidə olunan davranışını təqlid etməklə ölçmə siqnallarının fiziki reallığa uyğunluğunu qiymətləndirməyə şərait yaradır.

### B. Diskret zaman oxu və nümunələmə parametrləri

Aparılan sınaq çərçivəsində İnersial Naviqasiya Sisteminin akselerometr və girokop sensorlarından ölçmələr sabit nümunələmə tezliyi ilə aparılmış və bu ölçmələr əsasında diskret zaman oxu formalaşdırılmışdır.

Nümunələmə tezliyi:

$$f_s = 100 \text{ Hz}$$

Nümunələmə intervalı:

$$\Delta t = 0.01 \text{ s}$$

Ölçmə sayı:

$$N = 10$$

Diskret zaman anları aşağıdakı qayda ilə hesablanmışdır:

$$t_k = k \times \Delta t, \quad k = 1, 2, \dots, 10$$

Bu yanaşma nəticəsində zaman oxu ardıcıl və bərabər intervallarla diskretləşdirilmişdir. Sabit nümunələmə tezliyinin seçilməsi sensor siqnallarının zaman sıraları formasında riyazi təhlilini, sonrakı filtrasiya və inteqrasiya əməliyyatlarının korrekt aparılmasını təmin edir. Eyni zamanda, bu seçim

sensorlararası zaman uyğunsuzluğunun qarşısını alaraq bütün ölçmə kanallarının sinxronlaşdırılmasına imkan verir.

*C. Akselerometr siqnallarının çevrilmə modeli (Volt → m/s<sup>2</sup>)*

Akselerometr siqnalları m/s<sup>2</sup> ilə ölçülmüşdür. Akselerometrdən alınan xam ölçmələr əvvəlcə voltla qeydə alınmış, daha sonra ADC vasitəsilə rəqəmsallaşdırılaraq sensor datasheet-də göstərilən həssaslıq əsasında fiziki vahidlərə çevrilmişdir.

Hər bir zaman anında akselerometr ölçməsi aşağıdakı vektorla ifadə olunur:

$$a(t_k) = [a_x(t_k), a_y(t_k), a_z(t_k)], \quad k = 1, 2, \dots, 10$$

Ölçülən gərginlik siqnalları kalibrlemə əmsalları əsasında fiziki təcil vahidlərinə çevrilmişdir. Gərginliyin fiziki vahidə kalibrleməsi (Volt → təcil):

$$a_i(t_k) = \frac{V_i(t_k) - V_{offset, i}}{S}, \quad i \in \{x, y, z\}$$

Burada,

$V_i(t_k)$  – i-ci ox üzrə ölçülmüş gərginlik,  
 $V_{offset, i}$  – sıfır təcil üçün ofset gərginliyi,  
 $S$  – sensorun həssaslıq əmsalidir.

*D. Giroskop ölçmə modeli (drift və səs-küy komponentləri)*

Giroskop sensorları obyektin bucaq sürətini üç ox üzrə birbaşa ölçür. Hər bir diskret zaman anında giroskopdan alınan ölçmə nəticəsi aşağıdakı şəkildə ifadə olunur:

$$\omega(t_k) = \begin{bmatrix} \omega_x(t_k) \\ \omega_y(t_k) \\ \omega_z(t_k) \end{bmatrix}$$

burada

$t_k$  — nümunələmə intervalı  $\Delta t = 0.01$  s ilə müəyyən olunan diskret zaman anıdır

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — müvafiq olaraq  $x, y$  və  $z$  oxları üzrə ölçülmüş bucaq sürətləridir (rad/s)

MEMS əsaslı girooskop ölçməsi aşağıdakı modelə uyğun qəbul edilmişdir [11]:

$$\omega_i(t_k) = \omega_i^{real}(t_k) + drift_i(t_k) + n_i(t_k),$$

$$i \in \{x, y, z\}$$

burada,

$\omega_i^{real}(t_k)$  – obyektin faktiki bucaq sürəti,  
 $drift_i(t_k)$  – sensorun uzunmüddətli sabit və ya yavaş dəyişən sistematik xətası,  
 $n_i(t_k)$  – təsadüfi səs-küy komponentidir.

*E. Statistik qiymətləndirmə (orta qiymət və dispersiya)*

Sensor siqnallarının zaman sıraları modeli əsasında hər bir ölçmə kanalının statistik xüsusiyyətləri qiymətləndirilmişdir. Bu məqsədlə ölçmə ardıcılıqları üçün orta qiymət və dispersiya aşağıdakı ifadələr əsasında hesablanmışdır:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \quad \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^2$$

burada

$\mu$  – orta qiymət;

$\sigma^2$  – dispersiya;

$N$  – ölçmələrin sayı;

$x_k$  –  $k$ - cı zaman anında alınmış ölçmə qiyməti;

$(x_k - \mu)$  –  $k$ - cı ölçmənin orta qiymətdən fərqi (sapma).

IV. EKSPERİMENTAL SINAQLAR VƏ NƏTİCƏLƏR

Ölçmələr real laboratoriya şəraitini modelləşdirən statik və zəif dinamik ssenari üçün həyata keçirilmiş, əldə olunan nəticələr sensor siqnallarının zaman sıraları formasında korrekt toplanmasının və riyazi emalının mümkünliyünü nümayiş etdirmişdir.

*A. Diskret zaman oxunun formalaşdırılması üçün zaman anları*

Eksperimental sınaqlar zamanı akselerometr və girooskop sensorlarından ölçmələrin aparılması üçün vahid və diskret zaman oxu formalaşdırılmışdır. Ölçmələr sabit nümunələmə intervalı  $\Delta t = 0.01$  s ilə həyata keçirilmiş və hər bir ölçmə anı aşağıdakı ifadəyə əsasən hesablanmışdır. Bu yanaşma nəticəsində ölçmə prosesi bərabər zaman intervalları üzrə diskretləşdirilmiş və bütün sensor kanalları üçün vahid zaman indeksi təmin edilmişdir. Diskret zaman anlarının ədədi qiymətləri Cədvəl 1-də göstərilmişdir.

CƏDVƏL 1. DİSKRET ZAMAN ANLARININ ƏDƏDİ QIYMƏTLƏRİ

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_k$ (s)	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10

Formalaşdırılmış diskret zaman oxu eksperimental sınaqlar zamanı akselerometr və girooskop ölçmələrinin tam sinxronlaşdırılmasına imkan vermişdir. Bu isə sensor siqnallarının zaman sıraları formasında korrekt təqdim edilməsini və sonrakı mərhələlərin riyazi baxımdan ardıcıl şəkildə həyata keçirilməsini təmin etmişdir.

*B. Akselerometr ölçmələri*

Akselerometr sensorundan alınan xam gərginlik ölçmələri əvvəlcə voltla qeydə alınmış, daha sonra sensorun həssaslıq və ofset parametrləri əsasında fiziki vahidlərə (m/s<sup>2</sup>) çevrilmişdir. Ölçmələr sabit nümunələmə tezliyi ilə aparılaraq hər bir diskret zaman anı üçün üç ox üzrə təcil komponentləri müəyyən edilmişdir. Akselerometr sensorundan alınan xam ölçmələr birbaşa fiziki təcil vahidlərini deyil, gərginlik səviyyələrini əks

etdirdiyindən ölçmə nəticələrinin riyazi emalı üçün əvvəlcədən *sensorun kalibrəmə parametrlərinin müəyyən edilməsi* zəruridir. Bu məqsədlə sensorun həssaslıq əmsalı və sıfır təcil üçün ofset gərginlikləri nəzərə alınmışdır. İstifadə olunan kalibrəmə parametrləri və onların fiziki mənası Cədvəl 2-də təqdim olunur. Bizim laboratoriya nümunəmizdə bu rəqəmlər belə təyin olunmuşdur, real sensor datasheet-də fərqli ola bilər (Cədvəl 3).

CƏDVƏL 2. AKSELEROMETR SENSORUNUN ÖLÇMƏ MODELİNƏ AİD KALİBRƏMƏ VƏ HƏSSASLIQ PARAMETRLƏRİ

Parametr	Dəyər	Qeyd
Sensor həssaslığı	$S = 0.02 V/(m/s^2)$	$1 m/s^2 = 0.02 V$
$0 m/s^2$ ofset (X,Y)	$V_{offset, z} = 1.0$	Kalibrəmə üçün
$1 g$ ofset (Z oxu)	$V_{offset} = 1.2 V$	$9.81 m/s^2 = 1.2 V$

CƏDVƏL 3. AKSELEROMETR SİQNALLARININ DİSKRET ZAMAN ÜZRƏ ÖLÇMƏ NƏTİCƏLƏRİ

k	$V_x (V)$	$V_y (V)$	$V_z (V)$	$a_x (m/s^2)$	$a_y (m/s^2)$	$a_z (m/s^2)$
1	1.006	0.998	1.198	0.03	-0.01	9.80
2	1.008	0.996	1.200	0.04	-0.02	9.81
3	1.010	0.998	1.202	0.05	-0.01	9.82
4	1.008	1.000	1.198	0.04	0.00	9.80
5	1.012	1.001	1.204	0.06	0.01	9.83
6	1.010	1.002	1.200	0.05	0.02	9.81
7	1.008	1.001	1.198	0.04	0.01	9.80
8	1.006	1.000	1.196	0.03	0.00	9.79
9	1.008	0.998	1.200	0.04	-0.01	9.81
10	1.010	0.996	1.202	0.05	-0.02	9.82

Bu dəyərlər akselerometrin real laboratoriya şəraitində ölçdüyü yer cazibəsi sürətinin ətrafında baş verən kiçik fluktuasiyaları və sensor səs-küyünü əks etdirir. X və Y oxlarında müşahidə olunan kiçik dəyişikliklər statik vəziyyətdə olan zəif titrəmələrdən və ölçmə səhvlərindən qaynaqlanır. Aparılan sınağın praktiki nəticələri göstərir ki, dronun hərəkətsiz vəziyyətdə olduğu halda akselerometrin X və Y oxları üzrə çıxış siqnalları sıfır ətrafında cüzi fluktuasiyalar ( $\pm 0.02-0.05 m/s^2$  intervalında) nümayiş etdirir, Z oxu üzrə isə cazibə sürətinə uyğun sabit ( $9.8 m/s^2$  ətrafında) akselerasiya qeyd alınır. Bu müşahidələr akselerometr ölçmələrinin etibarlılığını və statik vəziyyətin düzgün identifikasiya edildiyini təsdiq edir.

### C. Giroskop ölçmələri

Giroskop sensoru vasitəsilə obyektin üç ox üzrə bucaq sürətləri ölçülmüşdür. Ölçmələr statik və zəif dinamik rejimdə aparıldığından faktiki bucaq sürətləri çox kiçik olmuş, ölçmə nəticələrində əsasən drift və səs-küy komponentləri müşahidə edilmişdir.

Cədvəl 4-də göstərilən nəticələrə əsasən bucaq sürətləri əsasən  $0-0.003 rad/s$  intervalında dəyişir. Ölçmələrdə həm müsbət, həm də mənfi qiymətlərin mövcudluğu MEMS əsaslı giroskoplara xas olan səs-küy və sistemə drift təsiri [11] ilə izah olunur və sınaq zamanı obyektin faktiki olaraq fırlanma hərəkətində olmadığını təsdiqləyir.

CƏDVƏL 4. GİROSKOP BUCAQLI SÜRƏT SİQNALLARININ ZAMAN SIRASI FORMASI

k	$\omega_x (rad/s)$	$\omega_y (rad/s)$	$\omega_z (rad/s)$
1	0.002	-0.001	0.000
2	0.003	-0.001	0.001
3	0.002	0.000	0.001
4	0.001	0.001	0.002
5	0.002	0.001	0.002
6	0.003	0.002	0.003
7	0.002	0.001	0.002
8	0.001	0.000	0.001
9	0.002	-0.001	0.001
10	0.003	-0.002	0.000

İlk zaman anlarında ( $k=1,2$ ) obyekt faktiki olaraq hərəkətsizdir.

$k=3-5$  intervalında bucaq sürətləri  $0.001-0.002 rad/s$  aralığında dəyişir ki, bu da zəif fırlanma ilə birlikdə təsadüfi səs-küy komponentlərinin mövcudluğunu göstərir.

$k=6$  anında ölçmələrdə nisbi artım müşahidə olunur; bu hal sensor driftinin qısamüddətli güclənməsi və müsbət səs-küy komponenti ilə əlaqələndirilir.

Sonrakı zaman anlarında ( $k=7-10$ ) bucaq sürətləri müsbət və mənfi istiqamətlərdə kiçik dalğalanmalar nümayiş etdirir. Bu davranış MEMS əsaslı giroskopların real laboratoriya ölçmələri üçün tipikdir və ölçmələrin fiziki reallığa uyğunluğunu təsdiqləyir.

Aşağıdakı müşahidələr ölçmə nəticələrinin real laboratoriya şəraitinə uyğun olduğunu göstərir:

- bucaq sürətlərinin  $0-0.003 rad/s$  intervalında olması zəif fırlanmanı əks etdirir;
- oxlar üzrə həm müsbət, həm də mənfi qiymətlərin mövcudluğu səs-küy və drift təsirinin göstəricisidir;
- siqnalların zaman üzrə kəskin dəyişməməsi MEMS giroskopların stabil işləmə rejimini göstərir.

Beləliklə, təqdim olunan giroskop siqnalları əvvəlki akselerometr ölçmələri ilə birlikdə İNS sensor siqnallarının zaman sıraları şəklində real laboratoriya şəraitində toplanmasını və onların xarakteristikalarının təhlilini təmin edir.

### D. Sensorların sinxronlaşdırılması və vahid ölçmə vektoru

Akselerometr və giroskop sensorlarından əldə olunan bütün ölçmələr vahid diskret zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılmışdır. Bu yanaşma nəticəsində hər bir zaman anı üçün akselerometr və giroskop məlumatları birləşdirilərək vahid ölçmə vektoru formalaşdırılmışdır:

Bütün sensor kanallarının eyni nümunələmə intervalı ( $\Delta t=0.01s$ ) üzrə toplanması sensorlararası zaman uyğunsuzluğunu aradan qaldırır və ölçmə məlumatlarının ardıcıl emalına imkan yaradır. Cədvəl 5-də göstəriləni kimi, hər bir k zaman indeksi üçün akselerometr və giroskop ölçmələri eyni diskret zaman anı tk ilə sinxronlaşdırılmışdır.

Bu yanaşma nəticəsində bütün sensor kanalları vahid zaman oxu üzrə uyğunlaşdırılmış və hər bir zaman anı üçün

ölçmələr vahid vəziyyət vektoru  $z(tk)$  şəklində formalaşdırılmışdır.

Cədvəl 5. İNS sensorlarının vahid zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılmış ölçmə vektoru

$k$	$t_k(s)$	$a_x$ ( $m/s^2$ )	$a_y$ ( $m/s^2$ )	$a_z$ ( $m/s^2$ )	$\omega_x$ ( $rad/s$ )	$\omega_y$ ( $rad/s$ )	$\omega_z$ ( $rad/s$ )
1	0.01	0.03	-0.01	9.80	0.002	-0.001	0.000
2	0.02	0.04	-0.02	9.81	0.003	-0.001	0.001
3	0.03	0.05	-0.01	9.82	0.002	0.000	0.001
4	0.04	0.04	0.00	9.80	0.001	0.001	0.002
5	0.05	0.06	0.01	9.83	0.002	0.001	0.002
6	0.06	0.05	0.02	9.81	0.003	0.002	0.003
7	0.07	0.04	0.01	9.80	0.002	0.001	0.002
8	0.08	0.03	0.00	9.79	0.001	0.000	0.001
9	0.09	0.04	-0.01	9.81	0.002	-0.001	0.001
10	0.10	0.05	-0.02	9.82	0.003	-0.002	0.000

Bu sinxronlaşdırma nəticəsində akselerometr və giroskop siqnalları arasında zaman uyğunsuzluğu aradan qaldırılmış, nəticədə sürətin və mövqenin inteqrasiyası, eləcə də vəziyyətin qiymətləndirilməsi (state estimation) alqoritmlərinin tətbiqi zamanı riyazi ziddiyyətlərin yaranmasının qarşısı alınmışdır. [12, 13].

E. *Statistik qiymətləndirmə* (orta qiymət və dispersiya)

Sensor siqnallarının zaman sıraları modeli əsasında əldə olunmuş  $N = 10$  ölçmə əsasında hər bir sensor oxu üzrə orta qiymət və dispersiya riyazi olaraq hesablanmışdır. Hesablamalar nəticəsində akselerometrin  $X, Y$  və  $Z$  oxları üçün uyğun olaraq aşağıdakı qiymətləri əldə edilmişdir (Cədvəl 6).

Cədvəl 6. Sensor siqnallarının orta qiymət göstəriciləri

Sensor	Ox	Orta qiymət $\mu$	Ölçü vahidi
Akselerometr	$a_x$	0.043	$m/s^2$
	$a_y$	-0.003	$m/s^2$
	$a_z$	9.81	$m/s^2$
Giroskop	$\omega_x$	0.0021	$rad/s$
	$\omega_y$	0.0000	$rad/s$
	$\omega_z$	0.0013	$rad/s$

Cədvəl 6-da göstərilən orta qiymətlərdən görüldüyü kimi, akselerometrin  $X$  və  $Y$  oxları üzrə sürətlənmə komponentləri sıfıra yaxın olmuş,  $Z$  oxu üzrə isə ölçmələr yer cazibəsi sürətlənməsi ətrafında cəmlənmişdir. Giroskop ölçmələri bütün oxlar üzrə  $10^{-3} rad/s$  səviyyəsində orta qiymətlər göstərmişdir ki, bu da sınaq zamanı obyektin fırlanma hərəkətində olmadığını və ölçmələrin əsasən sensor səs-küyü və kiçik bias (sabit ofset xətası) komponentlərini əks etdirdiyini təsdiqləyir.

Dispersiya və standart kənarlaşma göstəricilərindən görüldüyü kimi (Cədvəl 7), akselerometrin  $X$  və  $Y$  oxları üzrə dəyişkənlik yalnız zəif səs-küy və mikro-titrəmələrlə məhdudlaşmış,  $Z$  oxu üzrə isə ölçmələr yer cazibəsi sürətlənməsi ətrafında sabit şəkildə cəmlənmişdir.

CƏDVƏL 7. SENSOR SİQNALLARININ DISPERSİYA GÖSTƏRİCİLƏRİ

Sensor	Ox	Dispersiya ( $\sigma^2$ )	Standart kənarlaşma ( $\sigma$ )	Ölçü vahidi
Akselerometr	$a_x$	$9.0 \times 10^{-5}$	$9.49 \times 10^{-3}$	$m/s^2$
	$a_y$	$9.0 \times 10^{-5}$	$9.49 \times 10^{-3}$	$m/s^2$
	$a_z$	$1.44 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$m/s^2$
Giroskop	$\omega_x$	$5.44 \times 10^{-7}$	$7.38 \times 10^{-4}$	$rad/s$
	$\omega_y$	$1.56 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$rad/s$
	$\omega_z$	$9.00 \times 10^{-7}$	$9.49 \times 10^{-4}$	$rad/s$

Giroskop siqnallarının bütün oxlar üzrə  $10^{-3} rad/s$  səviyyəsində dəyişməsi sınaq zamanı obyektin fırlanma hərəkətində olmadığını və ölçmələrin əsasən sensor səs-küyü və kiçik bias komponentlərini əks etdirdiyini təsdiqləyir.

V. TƏKLİF OLUNAN SİSTEMİN PRAKTİK ƏHƏMİYYƏTİ

Aparılmış eksperimental sınaqlar nəticəsində əldə olunan ölçmə məlumatları göstərir ki, inersial naviqasiya sistemlərində akselerometr və giroskop sensor siqnallarının sabit nümunələmə tezliyi ilə diskret zaman oxu üzrə toplanması sonrakı riyazi emal mərhələləri üçün həlledici əhəmiyyət daşıyır. Diskret zaman oxunun əvvəlcədən formalaşdırılması və bütün sensor kanallarının vahid zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılması ölçmə məlumatları arasında zaman uyğunsuzluqlarını tam aradan qaldırılmışdır.

Akselerometr ölçmələrinin təhlili statik vəziyyətdə  $Z$  oxu üzrə təcil qiymətlərinin yer cazibəsi sürətlənməsi ətrafında cəmləndiyini,  $X$  və  $Y$  oxları üzrə isə yalnız zəif fluktuasiyaların mövcud olduğunu göstərmişdir. Bu nəticələr həm sensor kalibrəmə parametrlərinin düzgün seçildiyini, həm də ölçmələrin fiziki reallığa uyğunluğunu təsdiq edir. Giroskop ölçmələrində müşahidə olunan kiçik bucaq sürətləri və müsbət–mənfə dalğalanmalar isə MEMS əsaslı sensorlara xas olan səs-küy və drift təsiri ilə izah olunur və obyektin faktiki olaraq fırlanma hərəkətində olmadığını göstərir.

Sensor ölçmələrinin vahid ölçmə vektoru şəklində formalaşdırılması  $z(tk)$  filtrasiya, [14] inteqrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmləri üçün riyazi baxımdan ardıcıl və etibarlı giriş məlumatlarını təmin edir. Statistik qiymətləndirmə nəticələri (orta qiymət və dispersiya) ölçmə səs-küyünün aşağı səviyyədə olduğunu və sınaq müddətində sensor siqnallarının stabil xarakter daşdığını nümayiş etdirmişdir. Bu fakt, xüsusilə Kalman filtrinə, [15] əsaslanan alqoritmlərin tətbiqi zamanı ölçmə modellərinin düzgün qurulması baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Müzakirə olunan yanaşma göstərir ki, sensor siqnallarının zaman sıraları formasında korrekt toplanması yalnız texniki rahatlıq deyil, eyni zamanda inersial naviqasiya təhlükələrinin diskret mühitdə riyazi baxımdan düzgün reallaşdırılması üçün zəruri ilkin şərtidir. Bu xüsusiyyət peyk naviqasiya sistemlərindən asılı olmayan naviqasiya həllərinin etibarlılığını birbaşa artırır.

## NƏTİCƏ

Bu məqalədə inersial naviqasiya sistemlərində akselerometr və giroskop sensorlarından alınan ölçmə siqnallarının diskret zaman oxu üzrə zaman sıraları şəklində toplanmasının texniki və riyazi əsasları təqdim edilmişdir. MEMS əsaslı sensorlar üçün sabit nümunələmə tezliyi ilə formalaşdırılmış zaman oxu əsasında aparılan eksperimental sınaqlar ölçmələrin fiziki reallığa uyğunluğunu və statistik sabitliyini nümayiş etdirmişdir.

Aparılmış tədqiqat nəticəsində göstərilmişdir ki, sensor ölçmələrinin vahid zaman indeksi üzrə sinxronlaşdırılması və vahid ölçmə vektoru şəklində təqdim edilməsi filtrasiya, inteqrasiya və vəziyyətin qiymətləndirilməsi alqoritmlərinin korrekt tətbiqi üçün fundamental riyazi baza yaradır. Orta qiymət və dispersiya əsasında aparılan statistik təhlil ölçmə səs-küyünün aşağı səviyyədə olduğunu və sınaq zamanı obyektin statik rejimdə olduğunu təsdiqləmişdir.

Peyk əsaslı naviqasiya sistemlərindən asılılığın azaldılması müasir avtonom platformalar, xüsusilə pilotsuz uçuş aparatları və müdafiə təyinatlı sistemlər üçün texnoloji suverenliyin əsas komponentlərindən biridir. Məqalədə təqdim olunan metodoloji yanaşma daxili sensor məlumatlarına əsaslanan naviqasiya həllərinin qurulmasını mümkün edir və GPS siqnallarının itirilməsi və ya müdaxilə şəraitində sistemin funksionallığının qorunmasına xidmət edir. Beləliklə, İNS sensor siqnallarının zaman sıraları şəklində korrekt formalaşdırılması milli texnoloji müstəqilliyin gücləndirilməsi və kritik naviqasiya sistemlərinin etibarlılığının artırılması baxımından mühüm elmi və praktik əhəmiyyət daşıyır.

## ƏDƏBİYYAT

- [1] P. D. Groves, *Inertial Navigation Systems: Analysis, Design, and Integration*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2013.
- [2] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed. Stevenage, U.K.: IET, 2004.
- [3] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2013.
- [4] P. G. Savage, *Fundamentals of Strapdown Inertial Navigation*. Maple Plain, MN, USA: Strapdown Associates, 2000.
- [5] R. Nəbiyev and E. Məmmədov, *Pilotsuz uçuş aparatlarında naviqasiya sistemlərinin tətbiqi*. Bakı, Azərbaycan, 2021.
- [6] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.

- [7] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.
- [8] J. A. Farrell, *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [9] O. J. Woodman, *An Introduction to Inertial Navigation*. Cambridge, U.K.: University of Cambridge, Computer Laboratory, Tech. Rep., 2007.
- [10] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [11] N. El-Sheimy and Y. Li, *Inertial Sensors and Systems*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2007.
- [12] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
- [13] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, and T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2001.
- [14] A. H. Jazwinski, *Stochastic Processes and Filtering Theory*. New York, NY, USA: Academic Press, 1970.
- [15] S. Särkkä, *Bayesian Filtering and Smoothing*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2013.

## Time-Series-Based Acquisition of Sensor Signals in Inertial Navigation Systems: Technical and Mathematical Justification in the Context of Technological Sovereignty

Nigar Mammadova

The Academy of the State Security Service of the Republic of Azerbaijan named after Heydar Aliyev, Institute of Control Systems, Bakı, Azerbaijan

**Abstract**— This paper investigates the technical and mathematical foundations of collecting measurement signals from accelerometer and gyroscope sensors used in Inertial Navigation Systems (INS) in the form of discrete-time series. The operation of MEMS-based sensors at a constant sampling frequency, synchronization of measurements along a unified time index, and their representation as a unified measurement vector are analyzed through modeled laboratory experiments. The physical consistency of sensor signals, noise influence, and statistical characteristics are evaluated within a time-series framework. The results demonstrate that this approach establishes a reliable mathematical basis for filtering, integration, and state estimation algorithms, and contributes to ensuring technological sovereignty in autonomous systems by enabling navigation solutions independent of satellite systems.

**Keywords**— Inertial Navigation System; time series; accelerometer; gyroscope; discrete time axis; sampling frequency; sensor synchronization; statistical analysis; technological sovereignty.