

# Inersial Naviqasiya Sistemlərinə Əsaslanan Pilotsuz Uçuş Aparatlarında Zaman Anomaliyalarının Kriminalistik Analizi

Nigar Məmmədova

Dövlət Təhlükəsizliyi Xidmətinin Heydər Əliyev adına Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
Riyaziyyat İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
[nigar.mammadova2025@gmail.com](mailto:nigar.mammadova2025@gmail.com)

**Xülasə—** Məqalədə pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) təhlükəsizlik arxitekturasında inersial naviqasiya sistemlərinin (INS) rolu və bu sistemlərdə yaranan zaman anomaliyalarının rəqəmsal kriminalistik analizi tədqiq edilir. Kiberfiziki sistemlərdə təhlükəsizlik pozuntularının yalnız şəbəkə səviyyəsində deyil, həm də fiziki proseslərin dinamikası əsasında araşdırılmasının zəruriliyi əsaslandırılır. Xüsusilə, GNSS spoofing kimi sensor səviyyəli müdaxilələrin trayektoriya sabitliyinə və naviqasiya qərarlarına təsiri təhlil olunur. Tədqiqat işində sensor verilənlərinin zaman sıraları əsasında anomaliyaların aşkarlanması və kiber-hadisələrin rekonstruksiyası üçün yeni metodoloji yanaşma təklif edilir.

**Açar sözlər—** kiberfiziki sistemlər; inersial naviqasiya sistemləri; rəqəmsal kriminalistika; CPS kriminalistikası; zaman anomaliyaları.

## I. GİRİŞ

Kiberfiziki sistemlər (Cyber-Physical Systems – CPS) hesablayıcı, rabitə və fiziki proseslərin vahid inteqrasiya olunmuş mühitdə qarşılıqlı təsirinə əsaslanır və nəqliyyat, sənaye, enerji, səhiyyə və avtonom idarəetmə platformaları kimi kritik sahələrdə geniş tətbiq olunur. Bu sistemlərin əsas xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, rəqəmsal mühitdə baş verən pozuntular fiziki müstəvidə real və bəzən kritik nəticələrə səbəb ola bilər. Bu səbəbdən CPS təhlükəsizliyi yalnız informasiya təhlükəsizliyi problemi deyil, həm də fiziki sistemlərin dayanıqlılığı və idarəetmə sabitliyi problemi kimi qiymətləndirilir [1, 2].

Pilotsuz uçuş aparatları (UAV) bu baxımdan kompleks və yüksək riskli CPS nümunələrindən biridir. Müasir yanaşmalarda UAV sistemləri sensor, aparat, proqram və rabitə səviyyələrində çoxlaylı hücum səthinə malik sistem kimi modelləşdirilir [2]. Bu isə göstərir ki, təhlükəsizlik yalnız şəbəkə səviyyəsində deyil, həm də sensor inteqrasiyası, naviqasiya alqoritmləri və bortdaxili hesablama mühitində baş verən proseslərdən birbaşa asılıdır. Sensor səviyyəsində yaranan sapmalar sistemin xarici mühiti yanlış interpretasiya etməsinə və nəticədə qeyri-düzgün qərarverməyə səbəb ola bilər [3].

INS əsaslı UAV sistemlərində naviqasiya konturu adətən GNSS (Global Navigation Satellite System-Qlobal Naviqasiya Peyk Sistemi) və inersial ölçmə vahidlərinin (IMU) inteqrasiyası üzərində qurulur. Bu inteqrasiya mövqe və sürət qiymətləndirməsinin dəqiqliyini artırmaqla yanaşı, sistemə yeni

hücum vektorlarının daxil olmasına şərait yaradır. Xüsusilə GNSS spoofing hücumları açıq siqnal strukturu və aşağı güclü peyk siqnalları səbəbindən mülki sistemlər üçün ciddi təhlükə hesab olunur [4]. Belə hallarda sistemə ötürülən saxta siqnallar legitim məlumat kimi qəbul edilir və nəticədə mövqe, sürət və zaman parametrlərində sisteməlik sapmalar yaranır.

Son illərdə CPS təhlükəsizliyində fizika-əsaslı monitoring və zaman sırası analizi yanaşmalarına maraq artmışdır [5]. Bu yanaşmaların əsas ideyası sensor məlumatlarının zamana görə davranış modeli əsasında normal vəziyyətin formalaşdırılması və bu modeldən kənara çıxmaların anomaliya kimi identifikasiyasıdır. Bu kontekstdə zaman sinxronluğu, çoxsensorlu uyğunluq, qalıq səhvlərin (residual) dinamikası və ölçmə ardıcılığının sabitliyi sistemin düzgün işləməsinin əsas indikatorları kimi çıxış edir. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, GNSS ölçmələri ilə alternativ qiymətləndirmə mənbələri arasında uyğunsuzluqlar spoofing tipli hücumların aşkarlanmasında effektiv mexanizm kimi istifadə oluna bilər [6, 7].

Bununla belə, mövcud yanaşmaların əksəriyyəti real-vaxt rejimində anomaliyaların aşkarlanmasına fokuslanır [5] və zaman əsaslı sapmaların forensik kontekstdə – yəni hadisələrin sonradan rekonstruksiyası və sübut kimi istifadəsi baxımından sistemli analizi kifayət qədər tədqiq olunmamışdır. Halbuki zaman anomaliyaları yalnız cari sapmaların müəyyən edilməsi üçün deyil, həm də hadisələrin “nə vaxt?”, “necə?” və “hansı təsirlə?” baş verdiyini müəyyən etməyə imkan verən mühüm rəqəmsal izlər kimi çıxış edir.

Kiberfiziki sistemlərin rəqəmsal kriminalistikası baxımından bu məsələ xüsusi aktualıq kəsb edir. CPS mühitində insidentlərin araşdırılması yalnız hücumun aşkarlanması ilə məhdudlaşmamalı, eyni zamanda hadisələrin ardıcılığının rekonstruksiyası, səbəb-nəticə əlaqələrinin müəyyən edilməsi və sübutların etibarlı interpretasiyası kimi mərhələləri də əhatə etməlidir. UAV sistemlərində sensor axınları, telemetrik məlumatlar və uçuş jurnalları bu baxımdan əsas sübut mənbələri kimi çıxış edir və onların zaman strukturu hadisənin rekonstruksiyası üçün fundamental əhəmiyyət daşıyır.

Bu kontekstdə təqdim olunan məqalənin məqsədi INS-əsaslı UAV sistemlərində zaman anomaliyalarının forensik analizi üçün nəzəri çərçivə formalaşdırmaq və bu anomaliyaların kiberhücumların aşkarlanması və rekonstruksiyası prosesində

istifadəsini əsaslandırmaqdır. Məqalənin elmi yeniliyi zaman davranışının CPS naviqasiya sistemlərində həm anomaliyaların aşkarlanması, həm də forensik rekonstruksiya məqsədləri üçün vahid və integrasiya olunmuş analitik çərçivədə birləşdirilməsi ilə xarakterizə olunur.

## II. PROBLEMİN QOYULUŞU VƏ MƏQSƏD

Müasir kiberfiziki sistemlərdə, xüsusilə INS-əsaslı UAV platformalarında təhlükəsizlik mexanizmləri əsasən real-vaxt rejimində anomaliyaların aşkarlanmasına yönəlmişdir. Mövcud yanaşmaların əksəriyyəti sensor verilənlərinin statistik xüsusiyyətləri və ya model əsaslı qalıq səhvlərin (residual) analizi üzərində qurularaq sistemin cari vəziyyətində baş verən kənarlaşmaların müəyyən edilməsinə imkan verir.

Lakin bu yanaşmaların əsas məhdudiyyəti ondan ibarətdir ki, aşkarlanan anomaliyaların sonradan forensik analizi, yəni hadisələrin zaman ardıcılığının rekonstruksiyası, səbəb-nəticə əlaqələrinin müəyyən edilməsi və hücumun təsir mexanizminin izahı sistemli şəkildə təmin olunmur. Xüsusilə GNSS spoofing kimi sensor səviyyəli hüumlarda [8] yaranan anomaliyaların yalnız ani aşkarlanması kifayət etmir, bu anomaliyaların temporal dinamikasının təhlili və onların forensik sübut kimi interpretasiyası ayrıca problem kimi qalır.

Bundan əlavə, INS/GNSS integrasiya olunmuş naviqasiya sistemlərində çoxsensorlu məlumat axınlarının sinxronluq, gecikmə və ölçmə sabitliyi kimi temporal göstəricilərin sistemin düzgün işləməsinin əsas indikatorları olsa da, bu göstəricilərin vahid analitik çərçivədə həm anomaliyaların aşkarlanması, həm də forensik rekonstruksiya məqsədləri üçün istifadəsi kifayət qədər tədqiq olunmamışdır.

Beləliklə, əsas problem ondan ibarətdir ki, mövcud CPS təhlükəsizlik yanaşmaları zaman əsaslı anomaliyaların yalnız aşkarlanmasına fokuslanır, lakin bu anomaliyaların hadisələrin rekonstruksiyası və forensik sübut kimi istifadəsini təmin edən integrasiya olunmuş metodoloji çərçivə mövcud deyil.

Bu problemin həlli məqsədilə məqalənin əsas məqsədi INS-əsaslı UAV sistemlərində zaman anomaliyalarının həm aşkarlanması, həm də forensik rekonstruksiya üçün istifadə oluna biləcəyi vahid və integrasiya olunmuş analitik yanaşmanın formalaşdırılması və onun effektivliyinin əsaslandırılmasıdır.

Tədqiqat çərçivəsində INS/GNSS integrasiya olunmuş UAV sistemlərindən əldə edilən sensor verilənləri zaman sıraları şəklində modelləşdirilir və onların zamana görə davranışı analiz olunur. Sensor verilənləri diskret zaman anlarında formalaşdırılmış çoxölçülü müşahidə vektoru şəklində təqdim olunur və onların analizi üçün statistik və model əsaslı yanaşmalar tətbiq edilir. Bu məqsədlə çoxsensorlu məlumat axınlarının sinxronluğu, qalıq səhvlərin dinamikası və ölçmə ardıcılığının sabitliyi kimi göstəricilər statistik və model əsaslı yanaşmalar vasitəsilə qiymətləndirilir.

Anomaliyaların aşkarlanması üçün zaman sıraları üzərində kənarlaşmaların identifikasiyası, onların temporal dəyişmə xüsusiyyətlərinin təhlili və sensorlararası uyğunsuzluqların müəyyən edilməsi üsullarından istifadə olunur. Eyni zamanda, aşkarlanan anomaliyaların forensik analizi məqsədilə onların zaman üzrə inkişaf trayektoriyası öyrənilir və hadisələrin rekonstruksiyası üçün səbəb-nəticə əlaqələri formalaşdırılır.

## III. METODOLOJİ ƏSASLAR VƏ RİYAZİ MODEL

### *Sistem konfigurasiyası və sınaq ssenarisi*

Təklif olunan yanaşmanın yoxlanılması məqsədilə sınaq laborator şəraitdə qurulmuş INS-əsaslı UAV naviqasiya konturunun sadələşdirilmiş modeli üzərində aparılmışdır. Sınaq mühiti real uçuş platformasının bütün funksional komponentlərini tam şəkildə modelləşdirməyə də, zaman anomaliyalarının müşahidəsi, sensor axınlarının sinxronluğu və verilənlər arasındakı uyğunsuzluqların təhlili üçün yetərli hesab olunmuşdur. Bu yanaşma ilkin mərhələdə mürəkkəb sahə sınaqları olmadan nəzarət olunan mühitdə zaman əsaslı sapmaların (anomaliyalar/ kənarlaşmalar) modelləşdirilməsinə imkan verir. Sistem konfigurasiyası inersial ölçmə vahidi, GNSS məlumat mənbəyi, verilənlərin toplanması modulu və analiz blokundan ibarət olmuşdur. İnersial ölçmə vahidi kimi üçoxlu akselerometr və üçoxlu giroskop göstəricilərindən istifadə edilmişdir. GNSS modulu isə mövqe, sürət və zaman parametrlərini təmin edən xarici naviqasiya mənbəyi kimi nəzərdə tutulmuşdur. Hər iki mənbədən daxil olan verilənlər vahid zaman oxunda qeydiyyata alınmış və sonrakı analiz üçün verilənlər diskret zaman anlarında  $t_k = k \cdot \Delta t$  şəklində formalaşdırılmışdır. Verilənlərin toplanması sabit nümunələmə tezliyi ilə (məsələn, 100 Hz) həyata keçirilmişdir.

Laborator sınaq zamanı sensorlar sabit platforma üzərində yerləşdirilmiş, ilkin mərhələdə isə sistemin normal iş rejiminə uyğun baza müşahidələri toplanmışdır. Bu rejimdə akselerometr və giroskop siqnalları üçün aşağı amplitudalı təbii fluktuasiyalar, GNSS mənbəyi üçün isə sabit və ardıcıl zaman nişanları müşahidə edilmişdir. Belə baza rejimi sonradan anomaliyaların aşkar edilməsi üçün istinad davranış modeli kimi qəbul edilmişdir. Sensor verilənləri diskret zaman anlarında formalaşdırılmış çoxölçülü müşahidə vektoru şəklində təqdim olunaraq, akselerometr, giroskop və GNSS parametrlərinin birgə analizi həyata keçirilmişdir.

Sınaq ssenarisi iki əsas mərhələdə təşkil olunmuşdur. Birinci mərhələdə sistem normal rejimdə işlədilmiş və bütün sensor kanalları üzrə sinxron zaman sıraları formalaşdırılmışdır. İkinci mərhələdə isə nəzarət olunan müdaxilə ssenarisi tətbiq edilmişdir. Bu müdaxilə birbaşa real hücumun icrası kimi deyil, GNSS kanalında zaman gecikməsi, ölçmə sapması və ya ardıcılıq pozuntusu yaradan süni anomaliya kimi modelləşdirilmişdir. Belə yanaşma laborator şəraitdə təhlükəsiz və təkrarlana bilən sınaq aparmağa imkan vermişdir. Sınaq zamanı əsas müşahidə edilən göstəricilər kimi sensor axınlarının zaman sinxronluğu, akselerometr və giroskop siqnallarının sabitlik səviyyəsi, GNSS və INS mənbələri arasında uyğunsuzluq dərəcəsi, eləcə də qalıq səhvlərin dəyişmə dinamikası nəzərə alınmışdır. Xüsusi diqqət normadan kənara çıxan zaman gecikmələrinə, ölçmə ardıcılığında baş verən qırılmalara (diskret qırılmalar) və müxtəlif sensor mənbələri arasında sensorlararası koordinasiyanın pozulmasına (sensorlararası uyğunsuzluğa) yönəldilmişdir. Beləliklə, qurulmuş sistem konfigurasiyası və seçilmiş sınaq ssenarisi INS-əsaslı UAV mühitində zaman anomaliyalarının formalaşmasını nəzarət olunan laborator şəraitdə müşahidə etməyə, onların texniki göstəricilərini qeyd etməyə və sonrakı forensik təhlil üçün əsas yaratmağa imkan verir [9].

Riyazi model, nümunələnmə parametrləri və aşkarlama meyarı.

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

Nümunələnmə tezliyi:

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

Nümunələnmə intervalı:

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} = 0.001 \text{ s}$$

Ölçmə sayı:

$$N = 10$$

Diskret zaman anları aşağıdakı qayda ilə hesablanmışdır:

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

$t_k$ -sistemdəki diskret zaman anı;

$\Delta t$  -nümunələnmə intervalı.

Bu yanaşma nəticəsində zaman oxu ardıcıl və bərabər intervallarla diskretləşdirilmişdir. Sabit nümunələnmə tezliyinin seçilməsi sensor siqnallarının zaman sıraları formasında riyazi təhlilini, sonrakı filtrasiya və integrasiya əməliyyatlarının korrekt aparılmasını təmin edir. Eyni zamanda, bu seçim sensorlararası zaman uyğunsuzluğunun qarşısını alaraq bütün ölçmə kanallarının sinxronlaşdırılmasına imkan verir.

Əvvəlki tədqiqatımızda sensor verilənlərinin zaman sıraları şəklində toplanması və statistik xarakteristikalarının qiymətləndirilməsi əsasında göstərilmişdir ki, INS sistemlərində akselerometr və girooskop ölçmələrinin sinxron integrasiyası vahid müşahidə modelində təqdim olunmalıdır. Bu məqsədlə ölçmələr diskret zaman anlarında çoxölçülü müşahidə vektoru kimi formalaşdırılır:

$$z(t_k) = [a_x(t_k) \ a_y(t_k) \ a_z(t_k) \ \omega_x(t_k) \ \omega_y(t_k) \ \omega_z(t_k)]$$

Burada  $t_k$  nümunələnmə intervalı  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$  ilə müəyyən olunan diskret zaman anıdır. Verilənlər platformaya bərkidilmiş gövdə koordinat sistemində (body frame) ölçülür.  $a_x, a_y, a_z$  akselerometr tərəfindən ölçülən spesifik xətti sürətlənmə komponentlərini,  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  isə girooskop vasitəsilə əldə olunan bucaq sürəti komponentlərini ifadə edir. Qeyd etmək lazımdır ki, real sensor ölçmələri səs-küy və sistemə xətalar ehtiva edir və bu səbəbdən müşahidə vektoru sonrakı mərhələlərdə statistik modelləşdirmə və filtrasiya üsulları ilə emal olunur.

Normal rejim üçün etalon orta vektor:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z(t_k)$$

$\mu$  – orta qiymət;

$N$  - ölçmələrin sayı;

$z(t_k)$  -  $t$ -ci zaman anında alınmış ölçmə qiyməti

Qalıq səhvin hesablanması:

$$r(t_k) = z(t_k) - \mu$$

Qalıq səhvin norması:

$$R(t_k) = \|r(t_k)\|$$

Anomaliya kriteriyası:

$$A(t_k) = \begin{cases} 1, & R(t_k) > \delta \\ 0, & R(t_k) \leq \delta \end{cases}$$

Zaman sinxronluğu xətası:

$$\Delta \tau(t_k) = t_{GNSS}(t_k) - t_{INS}(t_k)$$

$t_{GNSS}(t_k)$  - GNSS (GPS və s.) tərəfindən verilən zaman;

$t_{INS}(t_k)$  - INS sisteminin daxili vaxtı.

#### IV. EKSPERİMENTAL SINAQLAR VƏ NƏTİCƏLƏR

Təklif olunan riyazi modelin işləmə prinsipini nümayiş etdirmək məqsədilə laborator şəraitdə formalaşdırılmış sadə müşahidə nümunəsi üzərində hesablama aparılmışdır. Nümunədə INS-əsaslı UAV sistemindən əldə edilən akselerometr və girooskop verilənləri, eləcə də GNSS və INS zaman nişanları arasındakı fərq nəzərə alınmışdır. Hesablamanın məqsədi normal rejim üçün etalon davranışın müəyyən edilməsi, sonrakı müşahidələrdə qalıq səhvlərin hesablanması və zaman anomaliyasının aşkarlanması nümayiş etdirilmişdir.

##### A. Başlanğıc şərtlər və qəbul edilən parametrlər

Hesablama nümunəsində nümunələnmə tezliyi  $f_s = 100 \text{ Hz}$ , zaman addımı isə  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$  qəbul edilmişdir. Diskret zaman dəyişəni

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

şəklində müəyyən edilmişdir (Cədvəl 1).

CƏDVƏL 1. DİSKRET ZAMAN DƏYİŞƏNİN QIYMƏTLƏRİ

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

İlk beş müşahidə sistemin normal iş rejimini xarakterizə edən etalon verilənlər, sonrakı beş müşahidə isə zaman uyğunsuzluğu və sensor kənarlaşması ehtiva edən nəzarət olunan anomaliya mərhələsi kimi götürülmüşdür. INS sisteminin zaman nişanları istinad vaxtı kimi qəbul edilmiş və laborator modeldə  $t_{INS}(t_k) = t_k$  bərabərliyi istifadə olunmuşdur.

##### B. Müşahidə vektorunun qurulması

Hər bir zaman anı üçün akselerometr və girooskop ölçmələri çoxölçülü müşahidə vektoru şəklində təqdim olunmuşdur. GNSS sistemindən əldə edilən zaman nişanları isə INS sisteminin vaxtı ilə müqayisə edilərək zaman fərqinin hesablanması üçün istifadə olunmuşdur. GNSS və INS sistemləri arasındakı zaman fərqi əlavə analiz parametri kimi nəzərə alınmışdır (Cədvəl 2).

GNSS sistemindən əldə edilən zaman nişanları müstəqil zaman referansı kimi istifadə olunmuş və INS sisteminin daxili vaxtı ilə müqayisə edilmişdir. Hər bir ölçmə anı üçün GNSS və INS sistemləri arasındakı zaman fərqi hesablanmışdır. Normal iş rejimində bu fərq kiçik amplitudalı fluktuasiyalar ( $\pm 1 \text{ ms}$ ) ətrafında dəyişdiyi halda, nəzarət olunan anomaliya

mərhələsində GNSS vaxtına əlavə edilmiş gecikmə nəticəsində zaman uyğunsuzluğunda kəskin artım müşahidə olunmuşdur.

CƏDVƏL II. INS VƏ GNSS SİSTEMLƏRİ ÜZRƏ EKSPERİMENTAL MÜŞAHİDƏ VERİLƏNLƏRİ

| (k) | ( $t_k$ ), (s) | ( $a_x$ ) | ( $a_y$ ) | ( $a_z$ ) | ( $\omega_x$ ) | ( $\omega_y$ ) | ( $\omega_z$ ) | $\Delta\tau$ (ms) |
|-----|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 1   | 0.01           | 0.02      | -0.01     | 9.80      | 0.001          | 0.000          | 0.002          | 0                 |
| 2   | 0.02           | 0.01      | 0.00      | 9.79      | 0.002          | 0.001          | 0.001          | 1                 |
| 3   | 0.03           | 0.03      | -0.02     | 9.81      | 0.001          | -0.001         | 0.002          | 0                 |
| 4   | 0.04           | 0.02      | -0.01     | 9.80      | 0.000          | 0.000          | 0.001          | -1                |
| 5   | 0.05           | 0.01      | 0.01      | 9.79      | 0.001          | 0.001          | 0.002          | 1                 |
| 6   | 0.06           | 0.05      | -0.03     | 9.86      | 0.012          | 0.004          | 0.015          | 18                |
| 7   | 0.07           | 0.07      | -0.04     | 9.88      | 0.015          | 0.005          | 0.018          | 21                |
| 8   | 0.08           | 0.06      | -0.02     | 9.90      | 0.013          | 0.004          | 0.017          | 19                |
| 9   | 0.09           | 0.08      | -0.05     | 9.87      | 0.016          | 0.006          | 0.020          | 24                |
| 10  | 0.10           | 0.09      | -0.03     | 9.91      | 0.014          | 0.005          | 0.019          | 22                |

#### C. Etalon vektorun hesablanması

Hesablama nümunəsində ümumi müşahidə sayı  $k = 1, 2, \dots, 10$  olmaqla qəbul edilmişdir. Bununla belə, etalon müşahidə vektoru yalnız normal iş rejimini xarakterizə edən ilk beş müşahidə əsasında formalaşdırılmışdır. Bu məqsədlə  $k = 1 - 5$  aralığında əldə edilmiş ölçmələrdən istifadə olunmuş və orta qiymət hesablanmışdır. Sonrakı  $k = 6 - 10$  müşahidələri isə anomaliya mərhələsi kimi qiymətləndirilmiş və etalon vektorla müqayisə olunmuşdur (Cədvəl 3).

Deməli etalon vektor

$$\mu_z = [0.018 \quad -0.006 \quad 9.798 \quad 0.001 \quad 0.0002 \quad 0.0016].$$

CƏDVƏL III. ETALON MÜŞAHİDƏ VEKTORUNUN ORTA QIYMƏTLƏRİ

| Parametr                | Riyazi işarə   | Orta qiymət |
|-------------------------|----------------|-------------|
| X oxu üzrə akselerasiya | ( $a_x$ )      | 0.018       |
| Y oxu üzrə akselerasiya | ( $a_y$ )      | -0.006      |
| Z oxu üzrə akselerasiya | ( $a_z$ )      | 9.798       |
| X oxu üzrə bucaq sürəti | ( $\omega_x$ ) | 0.001       |
| Y oxu üzrə bucaq sürəti | ( $\omega_y$ ) | 0.0002      |
| Z oxu üzrə bucaq sürəti | ( $\omega_z$ ) | 0.0016      |

#### D. Qalıq səhvin hesablanması

Sistemin cari vəziyyətinin etalon davranışdan kənarlaşmasını qiymətləndirmək üçün hər bir müşahidə üzrə qalıq səhv vektoru hesablanmışdır. Bu vektor müşahidə vektoru

ilə etalon vektor arasındakı fərqi ifadə edir. Hesablama metodunun aydın göstərilməsi məqsədilə qalıq səhv vektorunun hesablanması  $k=6$  müşahidəsi üçün mərhələli şəkildə təqdim olunmuşdur. Qalan müşahidələr üzrə hesablamalar analoji qaydada aparılmış və əldə edilən nəticələr Cədvəl 4-də ümumiləşdirilərək təqdim edilmişdir.

$$z(t_6) = [0.05 \quad -0.03 \quad 9.86 \quad 0.012 \quad 0.004 \quad 0.015]$$

Qalıq səhvin hesablanması:

$$r(t_6) = [0.032 \quad -0.024 \quad 0.062 \quad 0.011 \quad 0.0038 \quad 0.0134]$$

CƏDVƏL IV. QALIQ SƏHV VEKTORUNUN HESABLANMASI NƏTİCƏLƏRİ

| k  | $r_{a_x}$ | $r_{a_y}$ | $r_{a_z}$ | $r_{\omega_x}$ | $r_{\omega_y}$ | $r_{\omega_z}$ |
|----|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 6  | 0.032     | -0.024    | 0.062     | 0.0110         | 0.0038         | 0.0134         |
| 7  | 0.052     | -0.034    | 0.082     | 0.0140         | 0.0048         | 0.0164         |
| 8  | 0.042     | -0.014    | 0.102     | 0.0120         | 0.0038         | 0.0154         |
| 9  | 0.062     | -0.044    | 0.072     | 0.0150         | 0.0058         | 0.0184         |
| 10 | 0.072     | -0.024    | 0.112     | 0.0130         | 0.0048         | 0.0174         |

#### E. Qalıq norması:

Hesablamalar nəticəsində qalıq səhv vektoru komponentləri üzrə kənarlaşmalar əldə edilmişdir. Qalıq səhv vektorunun ümumi amplitudasını qiymətləndirmək məqsədilə onun Evklid norması hesablanmışdır (Cədvəl 5):

$$R(t_6) \approx 0.076$$

CƏDVƏL V. QALIQ NORMASININ QIYMƏTLƏRİ

| k  | $R(t_k) = \ r(t_k)\ $ |
|----|-----------------------|
| 6  | 0.0759                |
| 7  | 0.1052                |
| 8  | 0.1130                |
| 9  | 0.1075                |
| 10 | 0.1371                |

Hesablamalar göstərir ki, anomaliya mərhələsində əldə edilən bütün  $R(t_k)$  qiymətləri normal rejim üçün müəyyən edilmiş hədddən əhəmiyyətli dərəcədə böyükdür. Bu isə müşahidə vektorunun etalon davranışdan kənarlaşdığını və sistemdə anomaliya rejiminin formalaşdığını göstərir.

#### F. Normal rejim üçün həddin seçilməsi:

Normal iş rejiminə uyğun olan  $k=1-5$  müşahidələri üçün qalıq norması hesablanmış və nəticələr cədvəl şəklində təqdim olunmuşdur. Göründüyü kimi, bu qiymətlər kiçik diapazonda dəyişərək etalon vektordan minimal kənarlaşmanı göstərir ki, bu da sistemin normal rejimdə sabit işlədiyini təsdiqləyir. Qalıq norması üzrə anomaliya qərarının verilməsi məqsədilə bu qiymətlər əsasında orta qiymət, standart sapma və hədd göstəricisi müəyyən edilmişdir.

Normal rejimdə  $k=1-5$  üçün normalar:

| k | $R(t_k) = \ r(t_k)\ $ |
|---|-----------------------|
| 1 | 0.0049                |
| 2 | 0.0129                |
| 3 | 0.0220                |
| 4 | 0.0050                |
| 5 | 0.0196                |

Normal rejimə uyğun olan  $k=1-5$  müşahidələri üçün qalıq norması qiymətləri əsasında orta qiymət hesablanmış və

$$\bar{R} \approx 0.0129$$

olaraq müəyyən edilmişdir. Qalıq normasının standart sapması aşağıdakı ifadə ilə hesablanmışdır:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R(t_k) - \bar{R})^2}$$

$\sigma_R$  – qalıq normasının standart sapması;

$n$  - müşahidələrin sayı;

$k$  - müşahidələrin sıra nömrəsi;

$R(t_k)$  -  $k$ -cı müşahidə üçün hesablanmış qalıq norması;

$\bar{R}$  - qalıq normasının orta qiyməti;

Hesablamalar nəticəsində

$$\sigma_R \approx 0.0071$$

qiyməti alınmışdır. Anomaliya həddi isə 3-sigma qaydasına əsasən müəyyən edilərək

$$\delta = \bar{R} + 3\sigma_R \approx 0.0342$$

kimi qəbul edilmişdir. Alınmış hədd qiyməti əsasında anomaliya mərhələsinə uyğun müşahidələr üçün qalıq norması qiymətləri ilə müqayisə aparılmışdır. Aparılmış hesablamalar göstərir ki,  $k=6$  nöqtəsindən başlayaraq müşahidə vektoru etalon davranışdan sisteməlik şəkildə kənarlaşır və bütün nöqtələr üçün qalıq norması hədd qiymətini aşır. Bu dəyişiklik tədrici deyil, ani xarakter daşıyır və sistemdə struktur pozuntusunun baş verdiyini göstərir.

$$A(t_6) = A(t_7) = A(t_8) = A(t_9) = A(t_{10}) = 1$$

Zaman analizi nəticələri ilə birlikdə nəzərdən keçirildikdə, GNSS–INS zaman fərqi müşahidə olunan kəskin sıçrayış bu kənarlaşmanın təsadüfi deyil, koordinasiya və məqsədli xarakter daşdığını göstərir. Bu nəticə göstərir ki, zaman anomaliyaları yalnız aşkarlama vasitəsi deyil, həm də hadisələrin səbəb-nəticə əlaqələrinin müəyyən edilməsində mühüm forensik indikator rolunu oynayır.

Beləliklə, zaman sinxronluğunun qiymətləndirilməsi məqsədilə GNSS və INS sistemləri arasındakı zaman fərqi hesablanmışdır. Normal rejimə uyğun  $k=1-5$  müşahidələri üçün orta zaman fərqi

$$\bar{\Delta\tau} = 0.2 \text{ ms}$$

olaraq müəyyən edilmişdir. Zaman fərqi standart sapması aşağıdakı ifadə ilə hesablanmışdır:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta\tau(t_k) - \bar{\Delta\tau})^2}$$

$\sigma_\tau$  – zaman fərqi standart sapması;

$n$  - müşahidələrin sayı;

$k$  - müşahidələrin sıra nömrəsi;

$\Delta\tau(t_k)$  -  $k$ -cı müşahidə anında GNSS və INS sistemləri arasındakı zaman fərqi;

$\bar{\Delta\tau}$  - zaman fərqlərinin orta qiyməti;

Hesablamalar nəticəsində

$$\sigma_\tau \approx 0.75 \text{ ms}$$

qiyməti alınmışdır. Buna əsasən zaman sinxronluğu üçün hədd qiyməti 3-sigma qaydasına uyğun olaraq hesablanmışdır

$$\delta \approx 2.44 \text{ ms}$$

Anomaliya mərhələsinə uyğun  $k=6-10$  müşahidələri üçün  $\Delta\tau$  qiymətlərinin hamısı bu həddi aşdığından, həmin nöqtələrdə zaman sinxronluğunun pozulduğu qənaətinə gəlinmişdir.

## NƏTİCƏ

Təklif olunan yanaşma göstərir ki, INS-əsaslı UAV sistemlərində zaman davranışının analizi kiberhücumların aşkarlanması və onların sonrakı təhlili baxımından effektiv yanaşma kimi istifadə oluna bilər. Aparılmış hesablamalar nəticəsində həm qalıq norması, həm də GNSS–INS zaman fərqi əsasında əldə olunan göstəricilərin sistemdə baş verən dəyişiklikləri aydın şəkildə əks etdirdiyi müəyyən edilmişdir.

Əldə olunan nəticələr sensor qalıq analizi və GNSS spoofing təsirlərinə dair mövcud tədqiqatlarla uyğunluq təşkil edir və bu yanaşmaların zaman əsaslı genişləndirilməsi kimi qiymətləndirilə bilər. Xüsusilə zaman sinxronluğunun pozulmasının ayrıca indikator kimi istifadəsi yalnız anomaliyaların aşkarlanması üçün deyil, həm də hadisələrin səbəb-nəticə əlaqələrinin müəyyən edilməsi baxımından əhəmiyyətlidir.

Praktik baxımdan təklif olunan metod əlavə mürəkkəb infrastruktur tələb etmədən mövcud sensor məlumatları əsasında həyata keçirilə bilər və bu səbəbdən real sistemlərdə tətbiq potensialına malikdir [3, 10].

Beləliklə, aparılmış tədqiqat göstərir ki, zaman anomaliyalarının analizi kiberfiziki sistemlərdə həm aşkarlama, həm də forensik təhlil baxımından perspektivli metodoloji yanaşma kimi qiymətləndirilə bilər.

## ƏDƏBİYYAT

- [1] R. Mitchell, I.-R. Chen "A Survey of Intrusion Detection Techniques for Cyber-Physical Systems" ACM Computing Surveys, 2019.
- [2] H. Sandberg, A. Teixeira, K. H. Johansson "Security in Networked Control Systems: An Overview of Attacks and Defenses" Annual Reviews in Control, 2020
- [3] M. Psiaki, T. E. Humphreys "GNSS Spoofing and Detection: A Survey" Proceedings of the IEEE, 2020.
- [4] Y. Shoukry et al. "Event-Triggered State Observers for Sparse Sensor Attacks" IEEE Transactions on Automatic Control, 2020
- [5] Z. Zhang, X. Liu, J. Wang "Time-Series Anomaly Detection for Cyber-Physical Systems Using Deep Learning" IEEE Access, 2021
- [6] A. Al-Fuqaha et al. "Deep Learning for Cyber-Physical Systems Security: Challenges and Opportunities". IEEE Internet of Things Journal, 2021
- [7] S. Khan, S. Parkinson, Y. Qin "Fog Computing Security: A Review of Current Applications and Security Solutions" Future Generation Computer Systems, 2022
- [8] J. Krotofil, D. Gollmann "Industrial Control Systems Security: What is

Happening?" IEEE Security & Privacy, 2023

- [9] Y. Mo, B. Sinopoli, and S. Weerakkody, "Secure control against replay attacks," in Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Osaka, Japan, 2015, pp. 5797–5802.
- [10] T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon, and P. M. Kintner, "Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer," in Proceedings of the 2013 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2013, pp. 231–238.

### **Forensic Analysis of Time Anomalies in Cyber-Physical Systems: Detection of Cyberattacks in INS-Based UAV Systems**

**Nigar Mammadova**

Heydar Aliyev Academy of the State Security Service,  
Baku, Azerbaijan

*nigar.mammadova2025@gmail.com*

**Abstract**—Detection of security breaches in cyber-physical

systems should be performed not only at the network level but also based on the temporal behavior of physical processes. In this context, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) platforms and their INS-integrated control environments are of particular importance. Studies indicate that sensor-level interventions, such as GNSS spoofing, can significantly affect system trajectories and decision-making processes. This paper investigates the forensic analysis of time anomalies in INS-based UAV systems and substantiates their role in the early detection of cyberattacks. Sensor synchronization inconsistencies, time delays, and trajectory deviations are presented as a methodological basis for both anomaly detection and reconstruction of cause–effect relationships in cyber incidents.

**Keywords**- cyber-physical systems; inertial navigation system; digital forensics; CPS forensics; time anomalies.