



## Main Means of Navigating Unmanned Aircraft

Nickolay L. GEORGIEV, Venstislav I. PEHLIVANSKI, Ognyan G. TODOROV

Institute for Metal Science, Equipment and Technology  
with Hydro and Aerodynamic Centre “Acad. A. Balevski”,  
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mails: [niki0611@abv.bg](mailto:niki0611@abv.bg), [venpeh@abv.bg](mailto:venpeh@abv.bg), [odt@technopol.biz](mailto:odt@technopol.biz)

### Abstract

On the basis of analysis and summarization of some classifications and tactical and technical characteristics of existing unmanned aerial vehicles, a common classification of UAV is proposed for the most commonly used signs such as: category, action radius, flight height, functional purpose.

**Keywords:** Classification, Tactical and Technical Characteristics, Unmanned Aircraft (NSA), Navigation Systems, Frequency Channels.

## Основни средства за навигация на безпилотни летателни апарати

Николай Л. ГЕОРГИЕВ, Венцислав И. ПЕХЛИВАНСКИ, Огнян Г. ТОДОРОВ

### 1. Увод

Увеличаването на способностите на безпилотните летателни апарати (БЛА) е един от най-динамичните процеси в областта на съвременната авиация. Бурното развитие в тази област може да се сравни с много бурното и високоскоростно развитие на безжичните комуникации през последните 25 години.

Въпреки че радиоуправляеми безпилотни летателни апарати има още от преди около 80 години, то тяхното развитие и използване стана масово през последното десетилетие. Една от основните системи на БЛА е тази за навигация. Тази система е основата за използване на БЛА за изпълнение на редица задачи, между които и такива, насочени към трафик на стоки, индустриален шпионаж, нарушаване на личното пространство и пр. През последните години е тревожна тенденцията за включването на БЛА в арсенала на редица терористични и екстремистки организации и групи, което доведе до повишаване на техния оперативен капацитет и наложи преразглеждане на редица положения от теорията и практиката свързана със защита на обекти от критичната инфраструктура [1-6].

В предложения материал се описват и се анализират основните характеристики на навигационните системи, използвани от съвременните БЛА, като вниманието е съсредоточено главно към спътниковите навигационни системи.

### 2. Изложение

Ускореното развитие на информатиката, комуникациите, теорията на управлението, извличането и обработката на сензорна информация и др., създадоха предпоставки за нови, оригинални концепции и конкретни технически решения в областта на безпилотните летателни апарати. В тях се прилагат безпрецедентно високи нива на автоматизация и такива нови клонове на автоматиката като децентрализирано

управление на комуникиращи агенти, колективно движение в сензорни мрежи и др. БЛА изпълняват предназначението си чрез едновременно и взаимосвързано реализиране на множество задачи за управление. Една от основните системи, осигуряваща изпълнението на задачите на БЛА, са системите му за навигация. Навигацията е наука за методите и средствата за получаване на информация за положението и движението на подвижни обекти и за воденето им от една точка в пространството към друга по дадена траектория в определено време.

Основно навигационните системи [7-9] могат да се класифицират като автономни, неавтономни и смесени.

**Автономните** навигационни системи са бордови системи, предназначени за определяне на местоположението на подвижния обект самостоятелно (без използване на външни навигационни опорни точки). Основен признак, характеризиращ типа на автономните навигационни системи, е физическото поле, използвано за получаване на навигационната информация за определяне на местоположението на подвижния обект в зададена координатна система. По този признак автономните навигационни системи се разделят на:

- инерциални, използващи гравитационното поле на Земята (полето на земното притегляне);
- корелационно-екстремални, използващи физическите полета на повърхността на Земята (топографското поле на вертикалния профил на земната повърхност, полето на радиолокационното отражение от земната повърхност, полето на собственото радиотоплинно излъчване от земната повърхност и др.);
- оптически, използващи светлинните полета на естествените източници на светлина (звездите) и изкуствените такива (светлинни маяци)
- радионавигационни, използващи физическите явления излъчване и отразяване на електромагнитните вълни.

**Неавтономните навигационни системи**, използвани понастоящем в БЛА, са основно спътникови системи. Основните действащи в момента спътникови системи са GPS, GALILEO, GLONAS, BeiDou, NAVIC и QZSS [7,8,9].

Спътниковите навигационни системи имат три основни компонента:

- Космически – приемо-предаватели разположени на сателити;
- Контролен – приемо-предаватели в станции, разположен в земната повърхност и управляван от съответния ръководител на навигационната система;
- Потребителски – приемници, разположени в съответния потребител, в случая – в БЛА.

Основните недостатъци на инерциалните навигационни системи са:

- възможни грешки в определянето на началните навигационни параметри;
- несъвършенство на акселерометрите и жироскопите;
- възможна неточност на информацията за измененията на гравитационното поле по протежението на трасето на полета;
- висока стойност на прецизните електромеханически елементи;
- необходимост от предварителна юстировка на системата;
- по-големи габарити и маса.

Същевременно основните предимства на инерциалните навигационни системи са:

- непрекъснатост на определяне на местоположението и скоростта на подвижния обект;
- абсолютна шумоустойчивост;
- глобалност на действие по разстояние и височина;
- независимост на точността на фиксираната навигационна информация от маневрирането на обекта;
- значителен обем на формираната навигационна информация;
- способност за работа при всякакви метеорологични условия;
- наличие на различни устройства, работещи на базата на различни физически принципи и възможност за едновременното им използване;
- автономност.

Спътниковите системи за навигация са основните използвани системи за навигация в съвременните БЛА.

**Глобална система за позициониране („Global Positioning System“)** или GPS е първата и към настоящия момент най-развита спътникова навигационна система, по подобие на която са разработени останалите спътникови системи [7,8,9]. GPS, наричана още NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System) се състои от минимум 24 спътника, разположени в 6 орбити, на височина около 20000 километра (космически компонент), наземни контролни центрове с наблюдателни станции, разположени в различни точки на Земята и един или два потребителски компонента, разположени на БЛА, които обикновено са съвместими с няколко типа спътникови системи. Принципът на действие се базира на измерването на разстоянието от мястото в което се намира потребителския компонент до група спътници, чиито координати са точно определени и известни. Разстоянието се пресмята на базата на разликите във времето за разпространение на радиосигнала от различни спътници до дадения потребител.

Най-важните параметри на основните спътникови навигационни системи са показани в Таблица 1.

**Таблица 1 Параметри на основните спътникови навигационни системи**

<b>Система</b>	<b>Galileo</b>	<b>GLONASS</b>	<b>GPS</b>
<b>Собственик</b>	ЕС	Русия	САЩ
<b>Покритие</b>	Global	Global	Global
<b>Кодиране</b>	CDMA	FDMA CDMA	CDMA
<b>Височина</b>	23,222 km (14,429 mi)	19,130 km. (11,890 mi)	20,180 km (12,540 mi)
<b>Период</b>	14.08 h (14 h 5 min)	11.26 h (11 h 16 min)	11.97 h (11 h 58 min)
<b>Планиран брой сателити</b>	24	28	31 (минимум 24)
<b>Работни честоти (MHz)</b>	<b>E1</b> 1559-1591	<b>L1</b> 1589.0625-1605.375	<b>GPS L1</b> 1575.42 лента 15.345
	<b>E6 Band:</b> 1260-1300	<b>L2</b> 1242.9375-1248.625	<b>GPS L2</b> 1227.6 лента 11

	<b>E5</b> 1164-1214	<b>L3</b> 1201	<b>GPS L5</b> 1176.45-12.5
<b>Точност</b>	1m-общодостъпни	4.5m – 7.4m	15m
	0.01m-военни		

<b>Система</b>	<b>BeiDou</b>	<b>NAVIC</b>	<b>QZSS</b>
<b>Собственик</b>	Китай	Индия	Япония
<b>Покритие</b>	Регионално (Глобално след 2020)	Регионално	Регионално
<b>Кодиране</b>	CDMA	CDMA	CDMA
<b>Височина</b>	21,150 km (13,140 mi)	36,000 km (22,000 mi)	32,000 km (20,000 mi)
<b>Период</b>	12.63 h (12 h 38 min)	1436.0m (IRNSS-1A)	
		1436.1m (IRNSS-1B)	
		1436.1m (IRNSS-1C)	
		1436.1m (IRNSS-1D)	
		1436.1m (IRNSS-1E)	
		1436.0m (IRNSS-1F)	
		1436.1m (IRNSS-1G)	
<b>Работни честоти (MHz)</b>	<b>B1</b> 1559.05-63.15 лента 4.092	<b>L5:</b> 1164.45-1188.45 лента 24	<b>L5</b> 1176.45 лента 24
	<b>B2</b> 1195.14-1219.14 лента 24	<b>S</b> 2483.778- 2500.278 лента 16.5	<b>L2C</b> 1227.6 лента 11
	<b>B3</b> 1256.52-1280.52 лента 24		<b>E6/LEX</b> 1278.75 лента 20
<b>Точност</b>	10m общодостъпни	10m общодостъпни	1m общодостъпни
	0.1m военни	0.1m военни	0.1m военни

В системата GPS се използва метод за многостанционен достъп с кодово разделяне на каналите (CDMA), който осигурява защита от смущения на приеманите сигнали [6]. Всеки спътник предава радионавигационни сигнали с разширен спектър (SSS – Spread Spectrum Signal) на две кохерентни носещи честоти: 1575,42MHz (L1) и 1227,60MHz (L2).

Използваните от системата GPS са:

- L1 (1575,42MHz): Основна честота за GPS, използвана за носеща честота на сигналите, кодирани с граждански код;
- L2 (1227,60MHz): Използвана за кодиране на сигнала с военен код;
- L3 (1381,05MHz): Носеща честота на сигнали, използвани от Министерството на отбраната на САЩ за откриване на атомни детонации, изстрелване на ракети и други високо енергийни събития;
- L4 (1841.40MHz): Проучвана за допълнителни корекции на грешките в йоносферата;
- L5 (1176.45MHz): Предвидена за бъдещо гражданско и военно използване.

За да се пренесе необходимата за определяне на положението информация, носещите честоти са модулирани по фаза с два различни псевдослучайни кода и с

навигационното съобщение. Те съдържат съответно разстоянието до излъчващия спътник и положението на съзвездие от всички GPS-спътници.

Честотата L1 е модулирана с два кода и е предназначена за цивилни потребители, докато честотата L2 е модулирана само с един военен код. Навигационното съобщение се съдържа и в двата сигнала.

Всички сигнали, генерирани от GPS-спътниците, се получават като кратни на основната честота на атомните часовници на борда им. Спътниците от Block II/IIA са екипирани с два цезиеви и два рубидиеви часовника, които генерират синусоидален сигнал с основна честота  $f_0 = 10,23\text{MHz}$ .

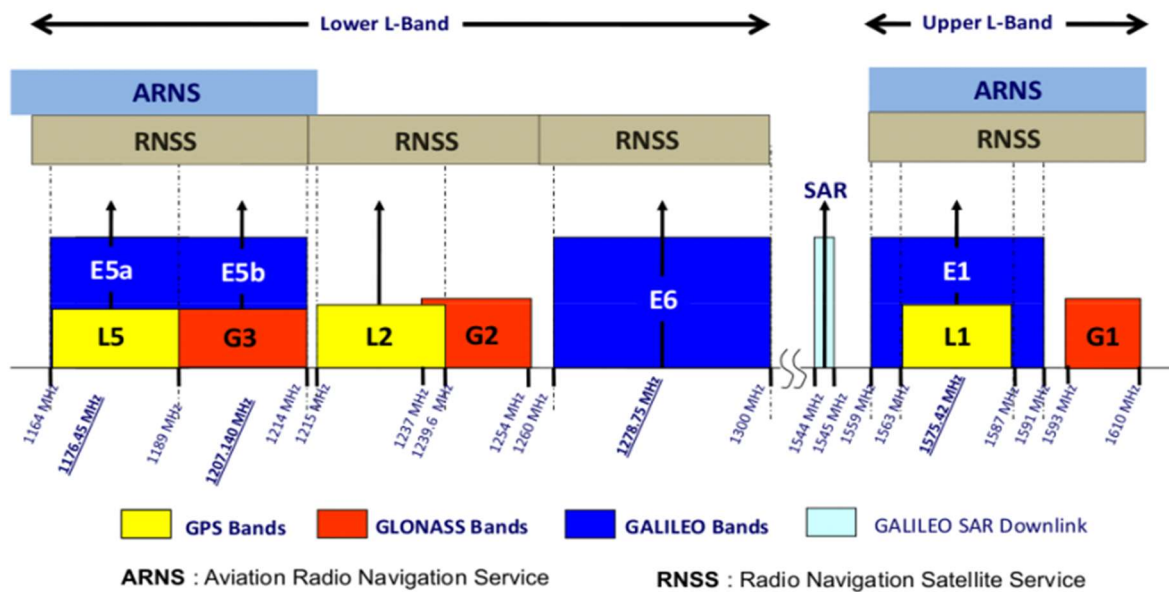
За да компенсира релативистичните ефекти, изходната честота, генерирана от спътниците, е  $10,23\text{MHz}$  (както се приема от наблюдател на земята), отместена с  $\Delta f = -4,57 \times 10^{-10} \text{ Hz}$ .

Чрез умножение на основната честота  $f_0$  по 154 и по 120 се получават съответно честотите на двата носещи сигнала L1 и L2:

$$f_{L1} = f_0 \times 154 = 1575,42\text{MHz} \text{ (дължина на вълната } \lambda_{L1} = 19\text{cm)}$$

$$f_{L2} = f_0 \times 120 = 1227,60\text{MHz} \text{ (дължина на вълната } \lambda_{L2} = 24\text{cm)}$$

Разпределението на честотните канали на някои спътникови навигационни системи са показани на Фигура 1.



**Фигура1** Разпределение на честотните канали на някои спътникови навигационни системи

Всички GPS-спътници излъчват сигнал на една и съща честота, но се приемат с различни поради ефекта на Доплер.

Псевдослучайните кодове (PRN code) се използват за определянето на разстоянието до спътниците. Тези кодове имат характеристики, близки до случаен шум, но с циклични повторения. Към псевдослучайните сигнали се добавят чрез сума по модул навигационните данни, които се съдържат в бордовите компютри на спътниците и се актуализират от земния команден център. Всеки спътник се идентифицира по псевдослучаен номер (PRN-number), което позволява използването на една и съща честота за всички спътници.

Съществуват два вида псевдослучайни кодове, които се използват при GPS: C/A-код („clear/access“ или „coarse/acquisition“ code) и P-код („private“ или „precise“ code).

C/A-кодът се състои от 1023 бита с повторение 1 милисекунда. Всеки спътник излъчва уникална поредица от 1023 бита, което позволява на приемника да го различи от останалите.

Прецизният P-код се използва за военни цели и представлява псевдослучаен код с цикъл на повторение 267 дни. Всеки спътник излъчва уникален отрязък от този код, който се променя всяка седмица.

Навигационната система GLONASS, за разлика от другите GNSS системи, използва различни DSSS техники, базирани на множествен достъп с честотно разделяне (FDMA), за да пренася своите сигнали за обхват

GLONASS използва FDMA и в под-лентите L1 и L2. Съгласно тази схема всеки сателит предава навигационни сигнали на своята собствена носеща честота, така че два GLONASS сателита могат да предават навигационни сигнали на същата носеща честота, ако са разположени в противоположни слотове на една орбитална равнина. Освен това, от спътниците GLONASS, в лентите L1 и L2 се излъчват два различни типа сигнали – стандартен сигнал (Standard Precision -SP) и сигнал с висока точност (High Precision -HP).

Стандартният сигнал за точност на GLONASS, известен също като C / A Code, има тактова честота от 0,511 MHz и е предназначен за използване от граждански потребители в световен мащаб, докато сигналът с висока точност (P Code) има тактова честота от 5,11 MHz и се модулира от специален код, който е достъпен само за потребители, упълномощени от Министерството на отбраната на Руската федерация. По този начин GLONASS-M, L1 и L2 осигуряват на потребителите стандартния код за точност C/A. Освен това модернизираният GLONASS ще предава FDMA сигнали на L3 лента и CDMA сигнали в L1 и L5.

Референтният сигнал на носещата честота на GLONASS L2 е 7/9 от референтната стойност на носещата L1, а носещата GLONASS L3 е 3/4 от референтната стойност на носещата L1. Известно е също така, че до 2005 г. спътниците GLONASS са използвали честотните канали  $k = 0, \dots, 12$  без никакви ограничения като канали с номера  $k = 0$  и 12 за технически цели. След това, GLONASS използва само честотните канали  $k = -7, \dots, +6$  и всички сателити, пуснати след тази година, ще използват филтри, ограничаващи емисиите извън обхвата до границата на вредни смущения, съдържаща се в Препоръката на CCIR-ITU 769 за радиочестотните ленти 1610.6-1613.8 MHz и 1660-1670 MHz.

Въпреки, че ограничението за използване на по-високите честотни канали засяга само лентата L1, тъй като параметърът  $k$  определя канала в обхвата L1 и L2, излъчванията в горните честоти на L2, съответстващи на каналите +7 до +13 бяха автоматично преустановени.

Спътниковите навигационни системи се използват основно в БЛА с малък и среден радиус на действие, докато в останалите БЛА в отделни случаи се използват и инерциалните навигационни системи.

### 3. Изводи

От изложеното може да се заключи, че спътниковите навигационни системи са изключително надеждни и подходящи за използване в БЛА. В тях е използван сложен математически апарат, реализиран в свръх модерни и надеждни радиотехнически системи.

Сигналите от тези системи трудно могат да бъдат симулирани и по този начин да бъдат нанесени вреди на ползвателите.

В БЛА с малък обзег на действие се използват предимно спътникови навигационни системи, поради по-ниската им себестойност, много добрата им точност, малките габарити и маса и лесната им експлоатация.

Основните недостатъци на сателитните навигационни системи използвани в БЛА са свързани със зависимостта на ползвателите от собствениците и операторите на съответната спътникова система и възможността за нарушаване на работата им чрез електромагнитни смущения.

За по-висока сигурност в някои типове БЛА се използват смесен тип навигационни системи – спътникови и инерциални.

## Литература

1. Stoichev K., D. Bratanov, S. Bourdzhiev. Model of Decision Making System in multivariate disasters “BULECHO”. Second Part, 2013, ISBN:978-954-92552-7-0
2. Стойчев К. Разработване на необходими инструменти за координиране на вътрешно-секторните дейности за защита на критична инфраструктура в ситуация на многостранна/многовариантна терористична заплаха. Повишаване способността за защита на ключови обекти от критичната инфраструктура в България – BULCIP. Сборник материали с резултатите от изпълнението на задачите по проект НОМЕ/2010/CIPS/AG/019, Втора част, ИМСТЦХ-БАН; ГД "Пожарна безопасност и защита на населението"-МВР; Академия на МВР; ВА "Г. С. Раковски"; РУ "А. Кънчев", 2013, ISBN:978-954-92552-7-0, с.1-176.
3. Stoichev K., D. Bratanov, S. Burdzhiev, D. Dimitrov, V. Panevski, G. Georgiev, G. Damjanov. Improvement of the urban security and defence through the implementation of advanced detection sensor system. Сб. докл. Четвърта национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност 2014“, 2015, ISSN:1313-8303, с.351-355.
4. Tumbarska A., P. Petkov. Non-lethal Weapons in the Context of the Restrictions Required by International Law. Сборник доклади от Научна конференция „Актуални проблеми на сигурността“, Том 4, НВУ "В. Левски", 2017, ISSN:2367-7465, с.148-158.
5. Тумбарска, А. Методология за оценяване потенциалните възможности на нелетални средства. Сб. Докл. Пета национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност 2015“, София, 22-23 октомври 2015, ISSN 1313-8303, с.334-338.
6. Tumbarska, A. Criteria for Evaluating the Capabilities of Groups of Similar Non-lethal Weapons. International Scientific Journal “Security & Future”, No.1, 2017, ISSN 2535-0668, p.30-33.
7. Беспилотные авиационные системы (БАС): ICAO CIR 328 AN/190 ИКАО. Монреаль, Канада: ИКАО, 2011
8. Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR): STANAG 4671, NSA/0976 (2009)-JAIS/4671, Edition 1
9. Satellite navigation, [https://en.wikipedia.org/wiki/satellite\\_navigation#cite\\_note-18](https://en.wikipedia.org/wiki/satellite_navigation#cite_note-18)