

ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ РАДІОМАЯКА БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

MEASUREMENT OF COORDINATES OF UNMANNED AERIAL VEHICLE RADIO BEACON

*Чигинь В. І., д-р фіз.-мат. наук, проф.,
Національна академія сухопутних військ, Україна
e-mail: vchygin@gmail.com*

*Vasyl Chyhin, Dr. Sc., Prof.,
Land Forces National academy, Ukraine; e-mail: vchygin@gmail.com*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.012>

Анотація. Розроблено і випробувано експериментальну систему для вимірювання параметрів траєкторії польоту власного об'єкта-радіомаяка, зокрема, у складі безпілотного літального апарата (БПЛА). Робота оснований на вимірюванні різниць фаз радіохвиль від радіомаяка, які надходять до рознесених антен. Як наземну приймальну пасивну радіо-систему використано скеровані антени типу п'ятиелементного квадрата. Вимірювач різниць фаз створено на основі мікросхеми AD8302, яка працює у діапазоні частот до 2,7 ГГц і забезпечує нелінійність вимірювання різниць фаз не більше ніж 1 град у діапазоні від 30 до 140 град. Експериментальна система дає змогу швидко переміщати генератор радіохвилі, встановлений у БПЛА "Фантом 3", у довільному напрямку щодо напрямку приймальних антен. Політ БПЛА у просторі, віддаленому від приземної поверхні, забезпечив різке зниження впливу навколишніх радіошумів. Отримані вперше за допомогою АЦП і спеціальної програми експериментальні залежності різниць фаз від часу польоту БПЛА задовільно якісно і кількісно описують теоретичну криву залежності різниць фаз радіохвилі з частотою 433 МГц від віддалі до антен.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, радіомаяк, пасивна радіолокаційна система, різниця фаз, координати.

Abstract. An experimental system for measuring the parameters of the flight trajectory of its own object-radio beacon, in particular, in the unmanned aerial vehicle (UAV) is developed and tested. Passive radio-location system is used. The difference-phase, difference-time and difference-frequency methods are compared. The first one provides the sufficient precision, not more than 1 deg. in the range of 30 to 140 deg. The phase measuring device is based on chip AD8302, operating at the frequency range up to 2.7 GHz. The fulfilled assessment has underlined the ability to measure the trajectory of objects-radio beacons in range of several kilometers.

A set of measurements has performed under different conditions in near ground and free atmosphere. UAV flight in air, far from the surface of ground, provided a sharp decrease of an influence of surrounding radio noises. The deviation of the UAV flight line from the vertical axis of the antenna is possible due to the deflection of the UAV from this axis at altitudes of 100 or more meters due to strong winds at these altitudes and due to the possible deviation of the antenna axis from the vertical. Obtained experimental dependences of the phase difference on flight time of the UAV are satisfactory and describe the dependence of the phase difference of radio waves at 433 MHz. The narrow RF filter eliminates the impact of most RF sources such as radio broadcast stations, industrial noise. Geometrical shortcomings can be avoided by inclusion of photodetectors and horizontally leveling of antennas. The obtained results envisage the system's suitability for localization of objects with radio beacons onboard in a range of several kilometers as well as the possibility of the proposed methodology application for measuring the coordinates of unknown UAVs and ballistic objects.

Key words: Unmanned aerial vehicle, Radio beacon, Passive radar system, Phase difference, Coordinates.

Вступ

Проблема створення пасивної радіолокаційної системи з використанням тільки приймальних блоків і радіомаяка у складі власного балістичного об'єкта у вільному польоті є актуальною. В [1] запропоновано вимірювати координати балістичного об'єкта під час польоту і на основі цього апроксимувати його місце падіння. Електронним методом можна заздалегідь вводити поправки на пуск наступного об'єкта. Така система має бути недорогою порівняно з відомою типу "Кольчуга", оскільки радіус її дії суттєво обмежений. Активні радіолокаційні станції легко виявити,

тому створюються пасивні системи типу "Кольчуга" для стеження за радіоелектронною обстановкою повітряного простору [2]. До систем радіослідкування за об'єктами, що переміщуються у просторі, можна зарахувати аеродромне обладнання СП-200, яке випромінює амплітудно-модульовані ВЧ сигнали у певній зоні, а відповідні пристрої на борту літака їх приймають і дають змогу визначати його місцезнаходження, коли він заходить на посадку. Радіолокаційна станція огляду льотного поля із системою скерованих пасивних радіолокаторів застосовується в аеропортах із великою інтенсивністю повітряних перевезень [3].

До основних методів радіолокаційного вимірювання відстаней належать різницево-фазовий, різницево-часовий і різницево-частотний. Різницево-фазовий метод ґрунтується на вимірюванні різниці фаз радіохвилі, яка надходить від радіопередавача до рознесених антен [4]. За відомої геометрії їх розміщення знаходять координати маяка. Різницево-часовий метод використовує порівняння часів приходу сигналу від маяка до рознесених антен. Для вимірювання використовують фронт імпульсу. Різницево-частотний метод ґрунтується на ефекті Доплера зниження частоти сигналу, який надходить до антен від маяка, що віддаляється [5].

Недоліки

Всі відомі активні й пасивні системи радіолокаційні системи є надто дорогими для широкого використання в областях з обмеженими дальностями для польотів балістичних об'єктів, а також різного типу БПЛА. Активній системі, яка існує, притаманний ще один недолік – електромагнітна видимість.

Постановка проблеми

Враховуючи обмеження, накладені на розглянуті типи систем радіолокації, створення пасивної радіолокаційної системи з використанням тільки приймальних блоків і радіомаяка у складі власного балістичного об'єкта могло би привести до заміни наявних активних чи пасивних систем.

Мета роботи

Метою праці є дослідження можливості створення системи вимірювання у польоті координат власного об'єкта – безпілотного літального апарата з радіомаяком – як пасивної різницево-фазової системи для вимірювань координат безпілотних літальних апаратів і балістичних об'єктів.

Методика і випробування експериментальної системи

Для визначення координат власного радіомаяка у складі безпілотного літального апарата під час польоту повинен увімкнутися бортовий генератор імпульсів, а випромінювання – вловити приймальні антени. Наземна приймальна радіосистема містить скеровані у напрямі польоту маяка рознесені селективні антени, високочастотні підсилювачі, потрібні для підсилення прийнятих радіоімпульсів до рівня, необхідного для надійного опрацювання, фазові детектори у разі різницево-фазового вимірювання, центральний процесор, ПК і програмне забезпечення. Приймальні антени через низькоенергетичні ретранслятори зводять сигнали до центрального процесора. В останньому сигнали дешиф-

руються і надходять шиною даних до програми обчислення координат радіомаяка. Ефективність методу різна для вибраного діапазону частот та великою мірою узалежнений від схемної реалізації радіомаяка та наземної апаратури.

Для експериментальних досліджень створено і випробувано макет пасивної радіолокаційної системи для вимірювання координати радіомаяка в складі квадрокоптера “Фантом-3”. Використана наявна елементна база з різницево-фазовим давачем типу AD8302 і дві рознесені скеровані антени типу п'яти-елементного квадрата [6]. Мікросхема AD8302 відома з літератури і доступна [7]. У ролі генератора використано випромінювальну частину переносної радіостанції типу ТС-508 із частотою генерування 433 МГц. Приймальні скеровані антени розносяться на певні віддалі, залежні від необхідної точності вимірювання за заданої дальності польоту об'єкта-радіозонда.

Математичні аспекти вимірювання координат. Відомі фазометри мають обмеження щодо області вимірювання різниці фаз, тому існують межі вимірювання координат радіомаяка. Для спрощення завдання розглянуто випадок двох приймальних антен, радіомаяк переміщали перпендикулярно до прямої, на якій розміщені антени. Якщо віддаль від першої антени до радіомаяка позначимо l_1 , від радіомаяка до другої антени – l_2 , а віддаль між антенами – S , то за довжини радіохвилі λ різниця фаз між сигналами $\Delta\varphi$ на антенах визначається за формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{S^2 + l_1^2} - l_1 \right). \quad (1)$$

Враховуючи, що наявний фазометр може вимірювати різницю фаз тільки в області $1^\circ - 180^\circ$, отримано умову недвозначності вимірювань віддалі, за якої різниця між віддальми від джерела сигналу до антен задовольняє нерівність $l_2 - l_1 < 0,5\lambda$:

$$l_1 > \frac{S^2 - 0,25\lambda^2}{\lambda}. \quad (2)$$

Крім того, оцінено максимальну віддаль, за якої різниця фаз обмежується чутливістю фазометра $\Delta\varphi_{кр}$:

$$l_1 < \frac{360^2 S^2 - \Delta\varphi_{кр}^2 \lambda^2}{720 \Delta\varphi_{кр} \lambda}. \quad (3)$$

У таблицю внесено обчислені за формулами (2) і (3) мінімальні й максимальні віддалі до радіомаяка, які дає змогу вимірювати пасивна система радіолокації із двох антен за довжини хвилі $\lambda = 0,693$ м, у разі віддалей S між антенами та вимірювання різниці фаз не нижче ніж $\Delta j_{кр} = 2^\circ$, що вдвічі вище від чутливості вибраного фазометра AD8302. Зниження критичного кута до 1° приведе до значного зростання максимальних віддалей до маяка, які можна виміряти.

Обчислені межові віддалі від радіомаяка до антени, якщо $I = 0,693 \text{ м}$ і $\Delta j_{кр} = 2^0$

Calculated boundary distances from radio beacon to antenna at $I = 0,693 \text{ м}$ і $\Delta j_{кр} = 2^0$

$S_{12}, \text{ м}$		$I_{\text{мін}}, \text{ м}$		$I_{\text{макс}}, \text{ м}$	
$0,5\lambda$	0,346	0	0	$22,5\lambda$	15,6
λ	0,693	$0,75\lambda$	0,52	90λ	62,4
2λ	1,386	$3,75\lambda$	2,59	360λ	249,5

Фазовий детектор для визначення різниці фаз між двома синусоїдальними сигналами, отриманими від двох антен, реалізовано на основі помножувача та інтегратора. На два входи вимірювача подають два синусоїдальні сигнали, які підсилюються і обмежуються за амплітудою так, щоб отримати два меандри. Ці прямокутні сигнали подаються на помножувач, результатом роботи якого є також прямокутний сигнал. Оскільки оперувати двополярним сигналом незручно, то його зводять до однополярного сигналу. Інтегратор виконує усереднення отриманого із помножувача сигналу. Фактично, інтегрування у цьому випадку зводиться до обчислення площі прямокутників, утворених граничними значеннями напруги та моментами переходу від одного крайнього значення напруги до іншого, які є, відповідно, зміщенням нульової точки і масштабним коефіцієнтом. Для спрощення роботи із сигналом його перетворено на логічний сигнал, а операцію інтегрування замінено на усереднення, що дає такий результат:

$$u_{\text{вих}}(j) = U_{\text{макс}} \cdot j / p. \quad (4)$$

Для реалізації цієї схеми подано сигнал із помножувача на логічний елемент-інвертор, який обмежує його і змінює полярність. На виході інвертора встановлено інтегруючу RC-ланку зі сталою часу, значно більшою від періоду сигналу. Ця ланка усереднює сигнал і на виході отримано напругу в межах від 0 до $U_{\text{макс}}$ (у випадку мікросхеми AD8302 – 1,8 В), пропорційну до різниці фази j . Мікросхема AD8302 працює у діапазоні частот до 2,7 ГГц і забезпечує нелінійність не більше ніж 1 град у діапазоні від 30 до 140 град. Рівень вхідного сигналу – 60,0 дБ, діапазон вимірюваної різниці фаз ± 90 град, діапазон вихідних напруг – 0–1,8 В, крутизна характеристики – 10 мВ/град. (рис. 1).

Методика експериментальних досліджень

Проведено серію вимірювань різниці фаз зі зміною координати радіомаяка в різних умовах – на полігоні, з горизонтальним його переміщенням (рис. 2, а), а також із закріпленням радіомаяка на квадрокоптері та вертикальним переміщенням (рис. 2, б). Різниці фаз автоматично записувались у пам'ять комп'ютера з інтервалом 0,1 с. Для цього виготовлено АЦП для введення даних у ноутбук, а також написано спеціальну програму для їх опрацювання. Виміряні різниці фаз порівнювали із обчисленими за формулою (1).

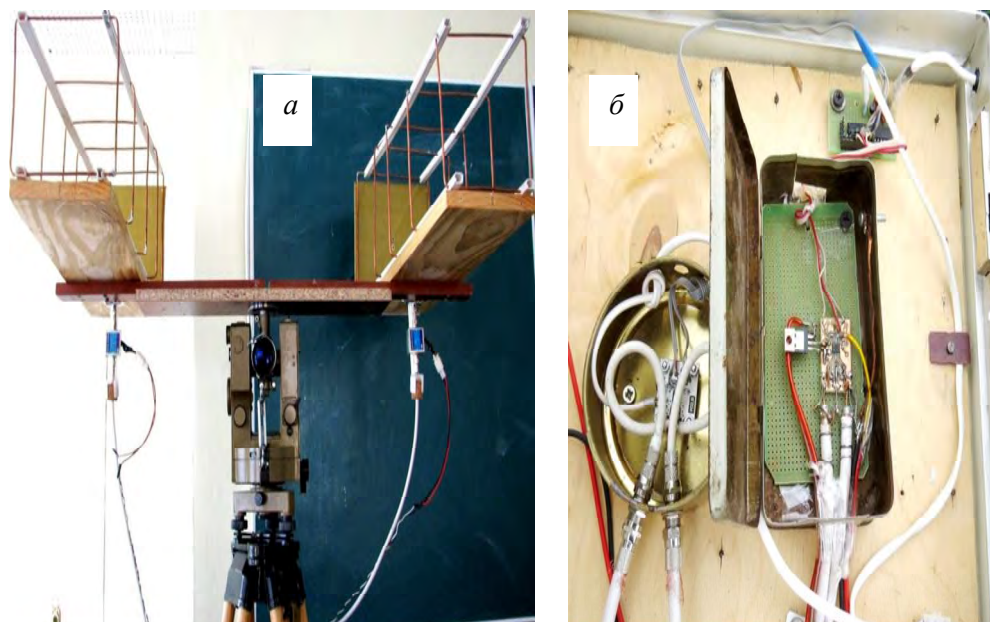


Рис. 1. Експериментальна установка: а – приймальні антени; б – два фазометри із виходами до антен (внизу) і до ноутбука (вверху)

Figure 1. Experimental installation: a – the receiving antennas; b – the two phase-meters with antenna inputs (below) and inputs to the notebook (above)

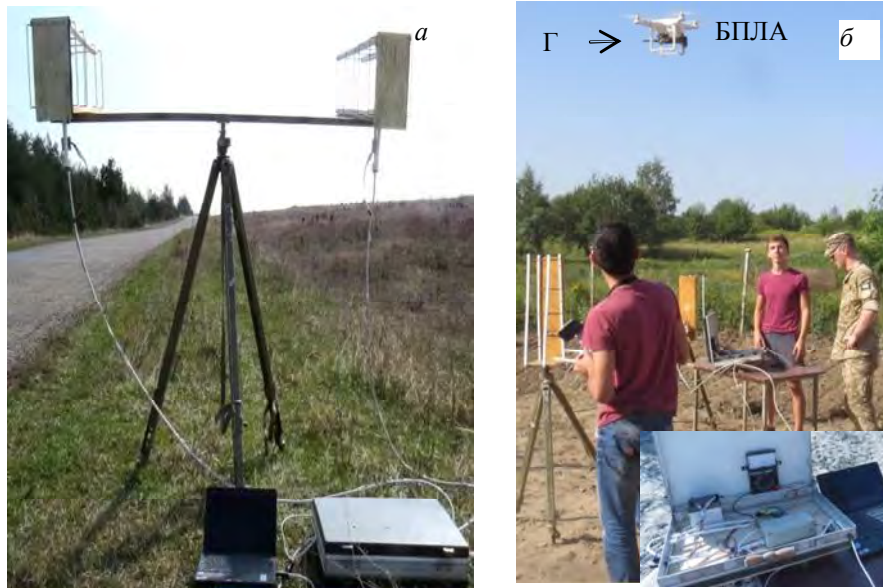


Рис. 2. Експериментальні дослідження: а – на полігоні;
б – за допомогою БПЛА “Фантом 3”: Г – генератор

Figure 2. Experimental research: a – at the landfill;
b – with the help of the UAV “Phantom 3”: G – generator

Безпілотний літальний апарат типу “Фантом 3” дає змогу підняти вертикально масу до 2 кг; загальна маса акумулятора і генератора, використаних в експерименті, не перевищує 600 г. Політ БПЛА з генератором відбувався строго вертикально до висоти приблизно 150 м над однією із антен, вздовж її осі. За командою вмикалися одночасно програми вимірювання і вертикальний політ БПЛА, програма записувала в *exe*-файл вихідну напругу з фазометра (мВ) кожні 0,1 с. Після заданого часу (30 с) генератор вимикався, щоб запобігти перегріванню. Потужність випромінювання генератора 5 Вт за енергії споживання 6 Вт. Цим обмежується дальність польоту безпілотного літального апарата.

Результати вимірювання

На рис. 3 зображено виміряні криві залежності різниці фаз між радіосигналами, які надходять до двох антен у разі горизонтального переміщення радіомаяка, від номера N запису фази у комп’ютер за: а) безвітряної; б) вітряної погоди.

Як видно з рис. 3, розкид значень виміряних різниць фаз в умовах горизонтального переміщення суттєво більший за вітряної погоди. На наш погляд, така нестабільність виміряних значень різниці фаз суттєво залежить як від потрапляння радіохвиль “чужих” радіопередавачів, так і від нестійкості антенної конструкції. Абсолютні значення різниць фаз в обох випадках близькі до обчислених за формулою (1) і відхилення між ними лежать у діапазоні 1–5 %.

На рис. 4 нанесено графіки, отримані у разі вертикального віддалення безпілотного літального апарата від однієї із пари вертикальних антен вздовж її осі. На рис. 4, а наведено експериментальну залежність різниці фаз від часу польоту БПЛА від початкової точки над антеною, на рис. 4, б – криву залежності різниці фаз від віддалі генератора радіохвилі до антени, обчисленої за формулою (1). Для перетворення виміряних різниць напруги фазометра на різницю фаз використано лінійну залежність: $-90^\circ - 0 \text{ В}$, $0^\circ - 0,9 \text{ В}$, $90^\circ - 1,8 \text{ В}$.

Початкові різкі зміни різниці фаз, що переходять від “плюсових” значень до “мінусових” і навпаки, відбувалися за невеликих віддалей генератора до антени, що підтверджує теорію. Можна зауважити, що за часу польоту 6,5 с (це – висота БПЛА над антеною близько 37 м), виміряне й обчислене значення різниці фази збігається і дорівнює 180 градусів. Після часу польоту 6,5 с отримуємо дві спадні криві, які за великих віддалей плавно наближаються до нуля градусів. Експериментальна крива спадає різкіше і різниця фаз сягає значень, близьких до нуля, за часу приблизно 24 с.

Зауважимо, що генератор сконструйовано так, що через 30 с він автоматично вимикається, щоб уникнути перегрівання. Отже, нульове значення різниці фаз у такий час може свідчити саме про його вимкнення. Після цього часу різниця фаз постійно підтримується на рівні, близькому до нульового значення. Це може свідчити про відсутність зовнішніх впливів (чужих генераторів) у вертикальному положенні й про достатню скерованість антен типу п’ятиелементного квадрата.

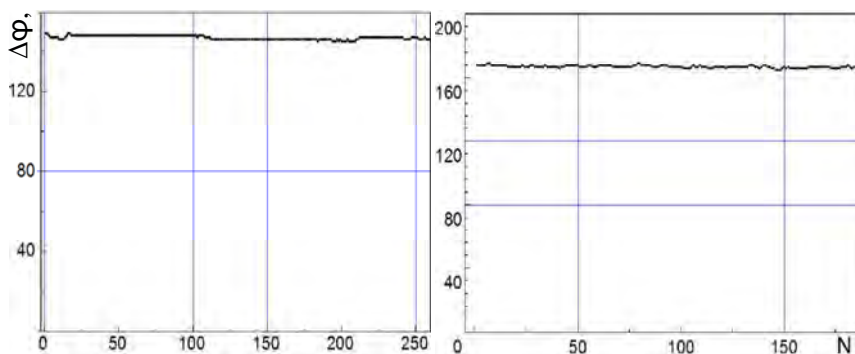


Рис. 3. Виміряні різниці фаз залежно від часу вимірювання ($t = 0,1 \times N$ с).

Віддалі від маяка до антени 35 м

Figure 3. Measured phase differences, depending on the measurement time ($t = 0.1 \times N$ s).

The distance from the radio beacon to the antenna is 35 m

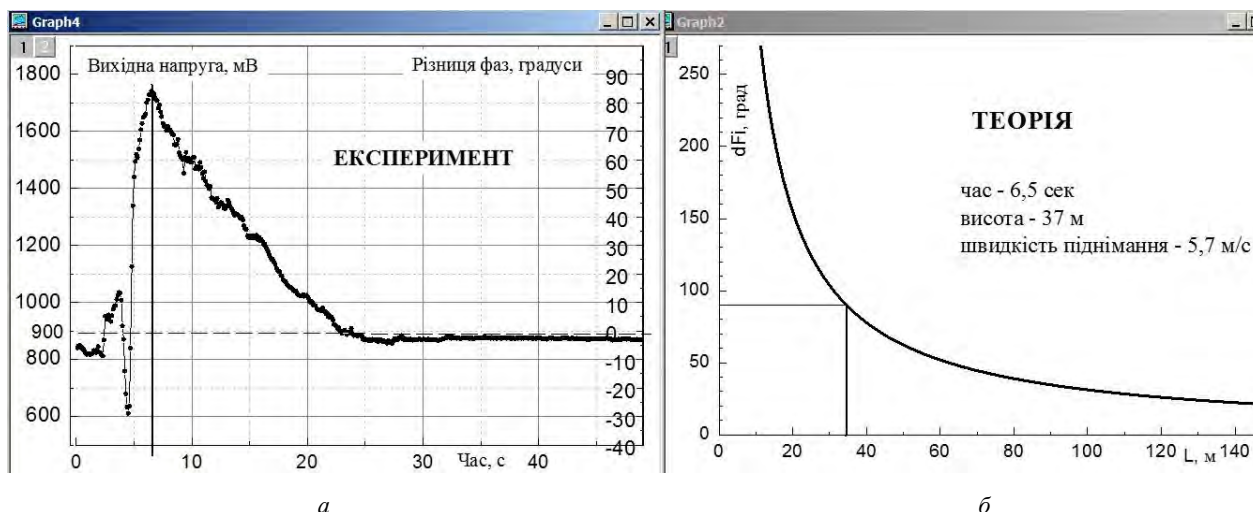


Рис. 4. Виміряна вихідна напруга U на фазометрі, мВ(зліва), різниця фаз $\Delta\phi$ (справа), отримана із напруги за допомогою лінійної залежності (а); теоретична крива, одержана табулюванням залежності $\Delta\phi$ від віддалі L до однієї з антен за відомих швидкості БПЛА й часу польоту (б)

Figure 4. To the left side is the measured output voltage U on the phase meter (in mV), to the right side is the phase difference $\Delta\phi$, obtained from the voltage with the help of linear dependence (a); the theoretical curve obtained by tabulating the dependence $\Delta\phi$ from distance L to particular antenna at the known UAV speed and flight time (b)

Висновки

Створений і випробуваний експериментальний макет пасивної радіолокаційної системи дає змогу вимірювати координати об'єкта-радіомаяка під час його руху. Математичні оцінки меж вимірювання вибраним фазометром вказують на можливість вимірювання віддалей до маяка, близьких до кілометрів, у разі задавання віддалі між приймальними антенами, близької до кількох довжин хвилі, яку випромінює радіомаяк. Пробні вимірювання різниці фаз у разі зміни координат випромінювача в різних умовах підтвердили зв'язок між різницею фаз двох радіосигналів, що надходять до антен, і координатами генератора. Зі зростанням відстані посилюється вплив зовнішніх

завад, що вказує на необхідність підвищення селективності антенного комплексу та його чутливості. Оригінальна методика вимірювання різниці фаз радіохвилі за допомогою безпілотної літального апарата "Фантом-3" дає змогу швидко переміщати генератор радіохвилі, зокрема, у вертикальному напрямку, і тоді спостерігається різке зниження впливу радіохвиль від підстильної поверхні Землі.

Подяка

Автор висловлює вдячність колективу кафедри електромеханіки та електроніки Національної академії сухопутних військ за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці та виконанні цієї роботи.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що ніякого фінансового або іншого можливого конфлікту, що стосується роботи, не існує.

Список літератури

[1] В. Чигін, С. Свідерок, Патент 58085 України, МПК F41G 3/00, спосіб отримання поправок для стрільби, 2011, Бюл. № 6.

[2] О. Коробка, “Пасивна радіолокація. Загальні перспективи розвитку”, *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*, вип. 2(6), с. 11–15, 2004.

[3] Л. Перевезенцев, А. Семенов. *Моноімпульсні вторинні радіолокаційні станції*. Київ, Україна: НАУ, 2005.

[4] А. Леонов, К. Фомичев. *Моноімпульсная радиолокация*. Москва, СССР : Сов. радио, 1970.

[5] Р. Довиак, Д. Эрнич. *Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения*. Ленинград, СССР, 1988.

[6] С. Сотников. *Дальне приёма телепередач*. Київ, Україна : Техніка, 1976.

[7] Analog Dialogue (n. d.). Technologies represented by market segments: Analog Devices. Retr. <http://analog.com/en/index.html>

References

[1] V. Chigin, S. Sviderok, Method for obtaining corrections for shooting. Patent UA 58085f, 2011, bull. 6.

[2] O. Korobka, “Passive radar. General prospects”, *Radioelectronic and computer systems*, iss.2(6), p. 11–15, 2004.

[3] L. Perevezentsev, A. Semenov, *Monopulse Secondary Radar Stations*. Kyiv, Ukraine : NAU, 2005.

[4] A. Leonov, K. Fomichev, *Mono-pulsed radar*, Moscow, USSR : Sov. radio, 1970.

[5] R. Doviack, D. Enich, *Doppler Radar and Meteorological Observations*, Leningrad, USSR, 1988.

[6] S. Sotnikov. *Far reception of telecasts*, Kyiv, Ukraine: Technics, 1976.

[7] Analog Dialogue (n. d.). Technologies represented by market segments: Analog Devices. Retr. <http://analog.com/en/index.html>