

УДК 621.396.967.001.4: 621.396.967.004

В.П. Антонюк, С.О. Воронков

*ДП «Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут», Львів*

## ОРГАНІЗАЦІЯ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ З ОЦІНКИ ОСНОВНИХ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНИХ СИСТЕМ

*Наведена методика експериментальної оцінки основних тактико-технічних характеристик пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки в умовах відсутності спеціально обладнаних полігонів і спеціальних вимірювальних засобів. Розглянуті питання організації натурного експерименту для проведення комплексних випробувань пасивної радіотехнічної системи по рухомих джерелах радіочастотного випромінювання. Наведені результати натурних випробувань пасивної TDOA системи з малою базою.*

**Ключові слова:** випробування, малобазова пасивна система, Time Difference of Arrival (TDOA), тактико-технічні характеристики (ТТХ), вимірювання.

### Вступ

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій.** При випробуваннях, а також у процесі експлуатації перспективних радіотехнічних комплексів і систем актуальною задачею є їх перевірка при роботі по реальних об'єктах. Така перевірка є найбільш інформативною і дозволяє отримати достовірні дані про функціонування зразка та його характеристики. Як правило, для цього використовують об'єкти літаками, пуски ракет і мішеней [1]. Метою таких перевірок для нових зразків військової техніки є встановлення відповідності досягнутих тактико-технічних характеристик (ТТХ) нового зразка техніки вимогам тактико-технічного завдання на розробку, а для зразків техніки, які знаходяться в експлуатації, – встановлення відповідності ТТХ системи даним, занесеним в її формуляр. В основному для проведення таких випробувань і натурних експериментів розробляється спеціальна програма, якою встановлюються мета, задачі, порядок, вимоги, методики проведення випробувань і натурних експериментів, та критерії оцінки результатів і підбиття підсумків. У більшості випадків проведення таких випробувань займає досить багато часу і потребує значних матеріальних затрат. Це пов'язано з юридичним оформленням дозволів на використання радіочастотного ресурсу, розробленням і виготовленням спеціального стендового і контрольно-перевірочного обладнання, формуванням польотних завдань, підготовкою льотних засобів, необхідністю створення спеціальних полігонів, витрачанням паливо-мастильних матеріалів, використанням авіації, або ракетної техніки і т.п.

У деяких випадках повноцінне проведення натурних випробувань неможливе. Тоді на практиці іноді застосовують дослідно-теоретичний метод [2],

суть якого полягає в порівнянні оцінок за результатами обмежених натурних випробувань із результатами математичного моделювання.

Наведені в [1-2] методи оцінки технічних характеристик стосуються лише активних радіолокаційних систем (РЛС), в той час як питанням експериментальної перевірки основних ТТХ пасивних систем в літературі приділено недостатньо уваги.

**Мета статті.** В цьому плані актуальною науково-прикладною задачею є розроблення відносно дешевої методики комплексних випробувань пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки в місцях їх дислокації без їх переміщення на спеціально обладнані полігони.

### Основний матеріал

Основною задачею пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки є визначення місцеположення джерел радіочастотного випромінювання (ДРЧВ). В умовах стаціонарного розташування ДРЧВ методика проведення натурних випробувань може бути досить проста. Вона зводиться до порівняння результатів координат місцезнаходження ДРЧВ, виміряних системою з координатами, отриманими, наприклад, шляхом високоточних геодезичних вимірювань. Дещо гірша ситуація виникає, коли необхідно провести комплексні випробування пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки по рухомих ДРЧВ, наприклад, розташованих на літаках або вертольотах.

У цьому випадку в якості контрольного вимірювача координат рухомого ДРЧВ пропонується використовувати вторинні радіолокатори системи управління повітряним рухом (УПР). Суть методики полягає в оцінці в режимі реального часу

місцеположення літаків цивільної авіації за сигналами їх бортових запитувачів, що входять до складу радіонавігаційних систем, та сигналами їх бортових відповідачів, що входять до складу системи УПР. Випробування необхідно здійснювати по літаках, що пролітають за розкладом польотів цивільної авіації та за маршрутами, які пролягають в межах зони дії пасивної системи, яку необхідно випробувати чи атестувати. В цьому випадку оцінка основних ТТХ пасивної системи проводиться методом порівняння вимірних нею координат рухомого ДРЧВ із координатами літака, вимірними вторинним радіолокатором системи УПР. Для проведення таких випробувань не потрібні спеціальні вимірювальні засоби, спеціальні дозволи на використання радіочастотного ресурсу і т.п., а лише отримання результатів вимірювання координат літаків, які в певні проміжки часу супроводжувались службою УПР. Для цього перед випробуванням необхідно визначити координати пасивної радіотехнічної системи і географічні координати вторинних радіолокаторів системи УПР із похибкою не більше 10м і їх висоти з похибкою не більше 1м. Крім цього необхідно провести прив'язку відліків координат об'єктів системи УПР і пасивної радіотехнічної системи з похибкою, що не перевищує 1с. Ідентифікацію сеансів вимірювання можна здійснювати за даними декодування коду літака, який передається бортовим відповідачем у режимі А. При оцінці результатів необхідно враховувати похибки вимірювання вторинного радіолокатора системи УПР, похибки прив'язки координат пасивної системи і вторинного радіолокатора системи УПР, і похибки часової прив'язки відліків в обох системах. Слід відмітити, що похибки вимірювання відстані вторинним радіолокатором УПР становлять 150...250м, а похибки, зумовлені неточністю часової прив'язки відліків при швидкостях літака до 900 км/год., не перевищують 25м. Похибка вимірювання азимуту літака і кута місця (в перерахунку до висоти польоту, яка передається в коді відповіді бортового відповідача) вторинним радіолокатором системи УПР не перевищує 0,2°, у той час як максимальна похибка вимірювання місцеположення ДРЧВ у пасивних системах відповідно становить:

- азимута  $\leq 1^\circ$ ;
- кута місця  $\leq 1^\circ$ ;
- відстані в секторі азимутальних кутів  $\pm 60^\circ$  – до 1% від відстані.

У зв'язку з тим, що похибки вимірювання координат вторинним радіолокатором системи УПР більш ніж в три рази менші за похибки вимірювання пасивною системою, то при випробуваннях останньої вторинний радіолокатор системи УПР

можна використовувати в якості контрольного вимірювача.

Згідно із запропонованою методикою порядок проведення випробувань зводиться до наступного:

- визначення вихідних даних;
- включення і контроль функціонування пасивної системи;
- виявлення і супроводження літаків;
- накопичення отриманої інформації;
- отримання координатної інформації від служби УПР;
- перерахунок координат літаків, отриманих від служби УПР, у систему координат пасивної системи;
- визначення похибок вимірювання координат пасивною системою.

До вихідних даних відносяться:

- географічні координати пасивної системи та її висота над рівнем моря;
- географічні координати наземних стаціонарних ДРЧВ, в тому числі вторинних РЛС-запитувачів системи УПР та відповідачів радіонавігаційних систем, та їх висота над рівнем моря;
- типи ДРЧВ і їх технічні параметри;
- можливі траси польоту літаків;
- типи літаків і їх характеристики (діапазон можливих швидкостей, діапазон можливих висот тощо);
- похибки вимірювання засобів вимірювання, зафіксовані в формулярі після чергової атестації.

Якщо вектор узагальнених координат ДРЧВ виразити у вигляді  $g = f\{R, \beta, \varepsilon\}$ , де  $R$  – відстань від початку координат до ДРЧВ,  $\beta$  – азимут ДРЧВ,  $\varepsilon$  – кут місця ДРЧВ, реалізацію узагальнених координат ДРЧВ, вимірних пасивною системою, виразити у вигляді потоку даних  $g_1, g_2, \dots, g_i$ , і реалізацію узагальнених координат ДРЧВ, вимірних вторинним радіолокатором системи УПР, виразити у вигляді потоку даних  $g_{e1}, g_{e2}, \dots, g_{ei}$ , то ряд похибок одиничних вимірювань буде визначатись виразом

$$\Delta g_{iei} = g_i - g_{ei} \quad (1)$$

а середньоквадратична похибка вимірювань за результатами статистики із  $N$  вимірювань за кожним із параметрів буде визначатись виразом

$$\sigma_g^2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta g_{iei}^2} \quad (2)$$

Для оцінки похибок вимірювання координат пасивної системи крім похибок вимірювання вторинного радіолокатора УПР слід враховувати похибки, зумовлені рефракцією радіохвиль у тропосфері, яка збільшує похибки вимірювання кута місця і відстані. Дійсні значення кута місця можуть відрізнитися від тих, що виміряні, на 2-3% при кутах

місця більше  $5^\circ$  і на 5-10% при кутах місця менше  $5^\circ$ . Графік поправок на похибки вимірювання кута місця в залежності від нахильної відстані і кута місця для стандартної атмосфери, розрахований у відповідності з [3], наведений на рис.1.

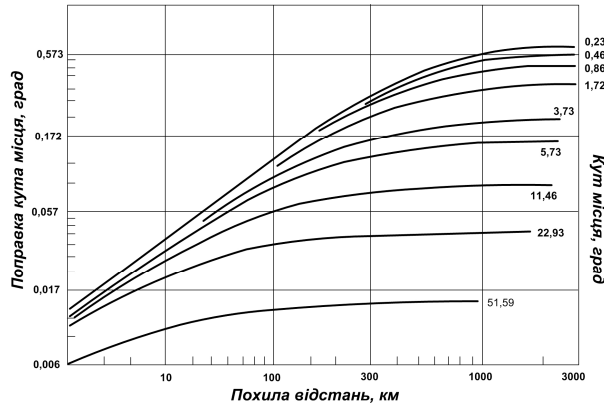


Рис.1. Поправки на похибки, які зумовлені рефракцією радіохвиль в атмосфері

Крім цього, у випадку когерентної пасивної системи, на результуючі похибки вимірювання координат ДРЧВ суттєво можуть впливати похибки, що зумовлені атмосферною турбулентністю і відбиттям від земної поверхні. Питання компенсації, або врахування похибок, зумовлених відбиттям від земної поверхні, розглянуті в [4-6].

Великомасштабні турбулентності в атмосфері несуттєво впливають на результати вимірювання координат ДРЧВ.

Вплив маломасштабних турбулентностей на результати вимірювання координат ДРЧВ досліджений недостатньо. Тому дослідження в цьому напрямку слід продовжити далі.

### Результати натурних випробувань малобазової пасивної TDOA системи

Вищеописана методика була апробована у ДП «Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут» при комплексних випробуваннях малобазової пасивної TDOA системи визначення місцеположення ДРЧВ імпульсних сигналів. Для оцінки похибок вимірювання координат ДРЧВ спочатку були проведені окремі дослідження параметрів апаратури системи в лабораторних умовах, оцінка ступеня когерентності системи та похибок вимірювання диференційного часу приходу сигналу. Геодезичними методами із застосуванням сучасних GPS-технологій з міліметровою точністю були проведені вимірювання геометричної конфігурації системи. Перед випробуванням теоретично були розраховані робочі зони системи для різних значень похибок. Результати теоретично

розрахованих зон з даними розташування малобазової пасивної TDOA системи і контрольного вимірювального пункту – вторинного радіолокатора системи УПР наведені на рис.2.

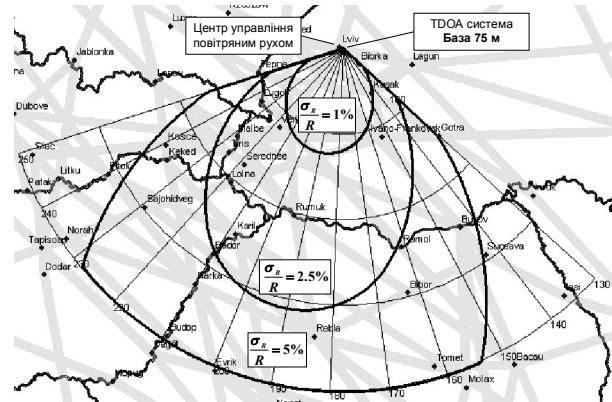


Рис.2. Умови проведення натурних випробувань

Дані вимірювання координатної інформації з прив'язкою до астрономічного часу і коду відповіді в режимі А запам'ятовувались під час вимірювання в базі даних малобазової пасивної TDOA системи і могли виводитись на монітор пульта управління системи як в реальному часі, так і в режимі програвача в будь-який момент часу після сеансу вимірювання. Для розрахунку координатної інформації також в реальному часі проводилась оцінка несучої частоти сигналу методом Проні. Дані системи УПР в текстовому форматі з прив'язкою до астрономічного часу і коду літака, які були отримані з диспетчерського пункту аеропорту, вносились у пристрій вторинної обробки інформації малобазової пасивної TDOA системи для оцінки похибки вимірювання в процесі обробки по закінченні сеансу вимірювання.

Для оцінок похибок у загальному були оброблені дані вимірювання більше ніж по 100 літаках. Типові результати експериментальних досліджень координатної інформації наведені на рис.3 – рис.8. Результати оцінки несучої частоти сигналу на інтервалі спостереження за радіоімпульсами тривалістю  $(0.45 \pm 0.1)$  мкс наведені в таблиці.

У процесі випробувань виявлено негативний вплив високорослих дерев і кущів, що знаходились на відстані 30 – 100 м від антен приймальних пунктів малобазової пасивної TDOA системи, на результати вимірювання координат ДРЧВ. Для ліквідації такого впливу необхідно, щоб простір перед пунктами прийому в напрямку зони контролю мав спеціально сплановані ділянки землі з нерівностями не більше 1м.

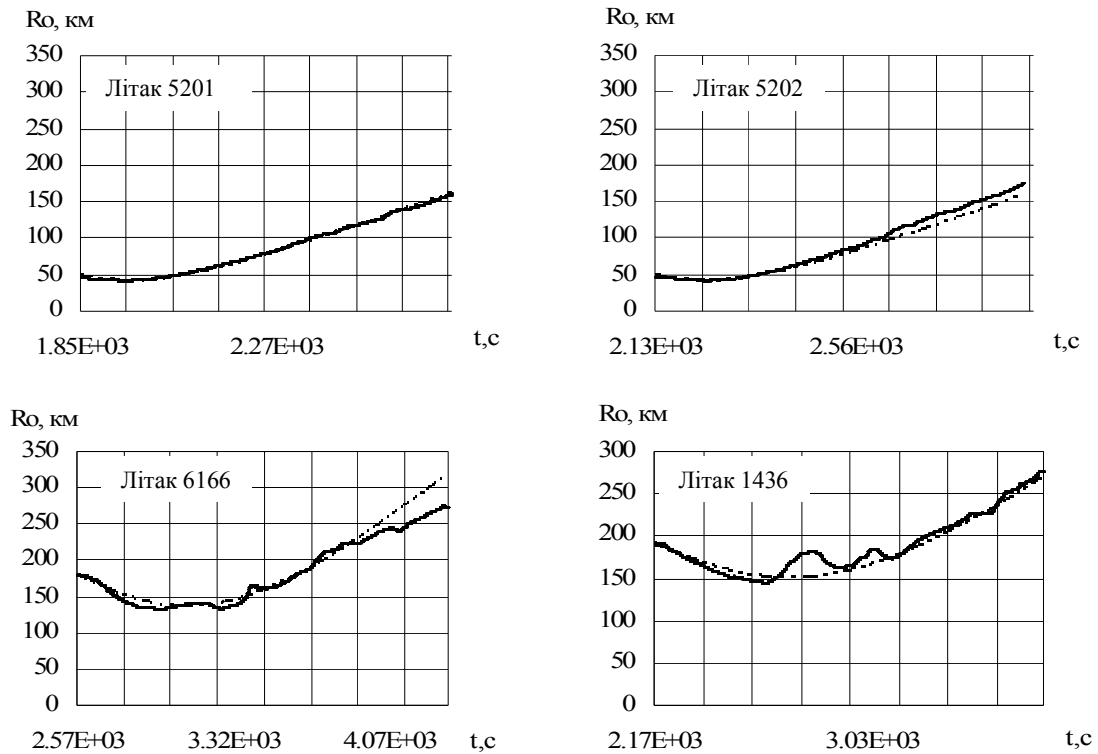


Рис.3. Результати вимірювання відстані до ДРЧВ (Літаки 5201, 5202, 6166, 1436)  
 - - - - система УПР ————— малобазова пасивна TDOA система

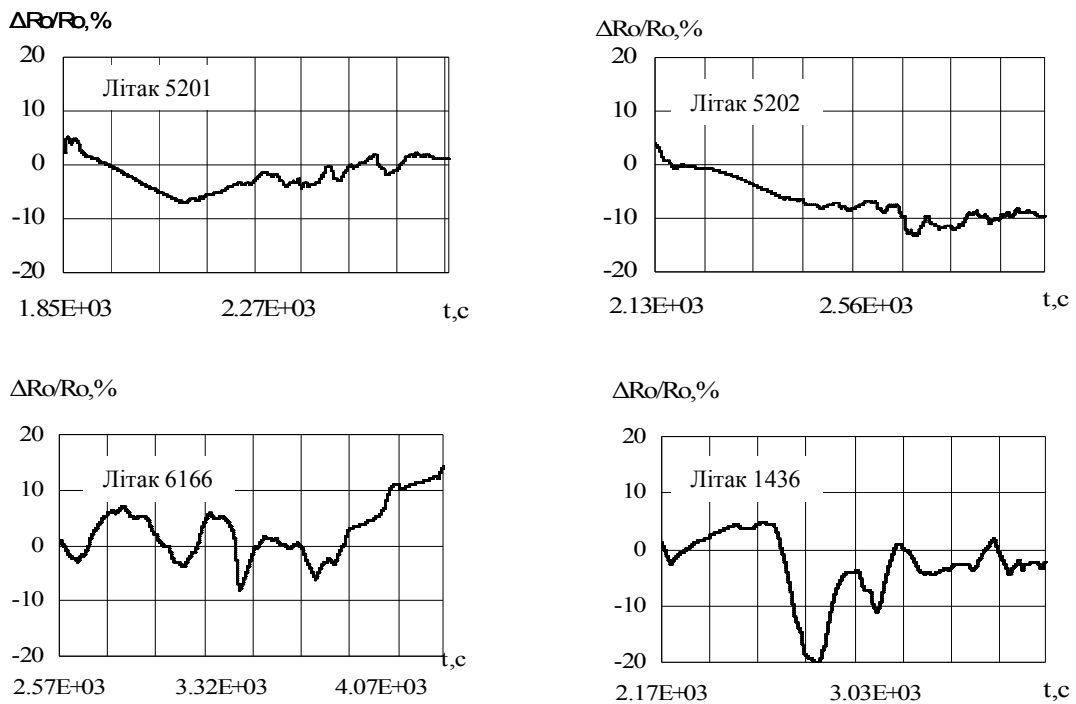


Рис.4. Відносні похибки вимірювання відстані до літаків 5201, 5202, 6166, 1436

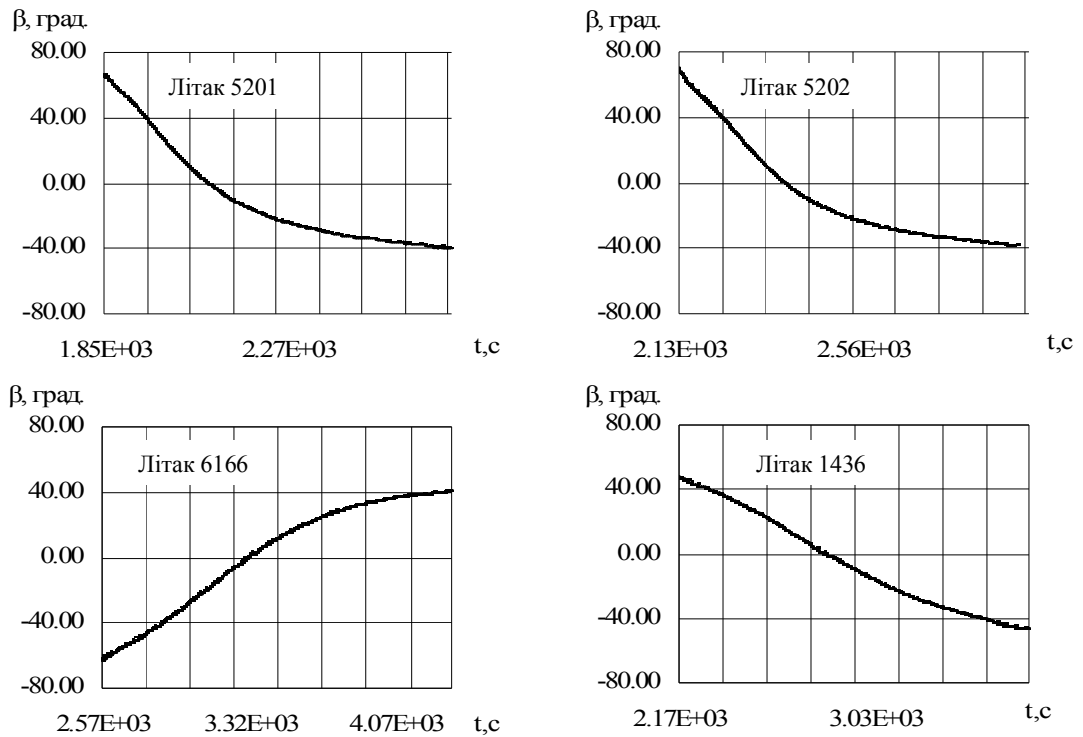


Рис.5. Результати вимірювання азимута літаків 5201, 5202, 6166, 1436

----- система УПР      ————— малобазова пасивна TDOA система

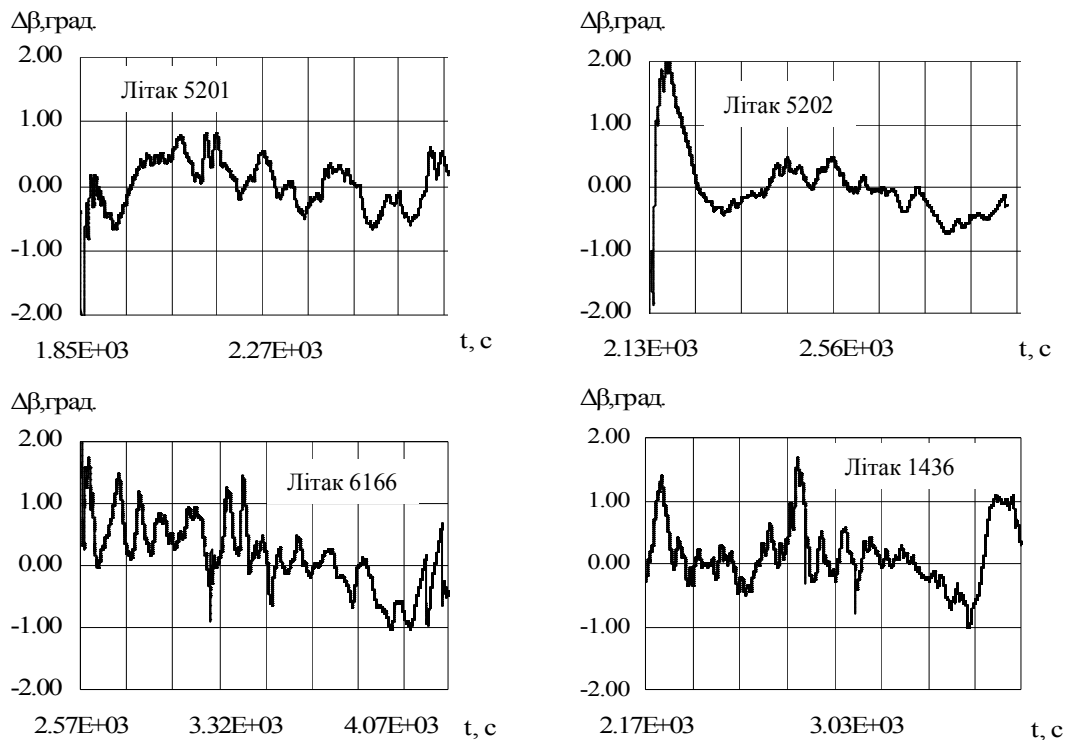


Рис.6. Абсолютна похибка вимірювання азимута літаків 5201, 5202, 6166, 1436

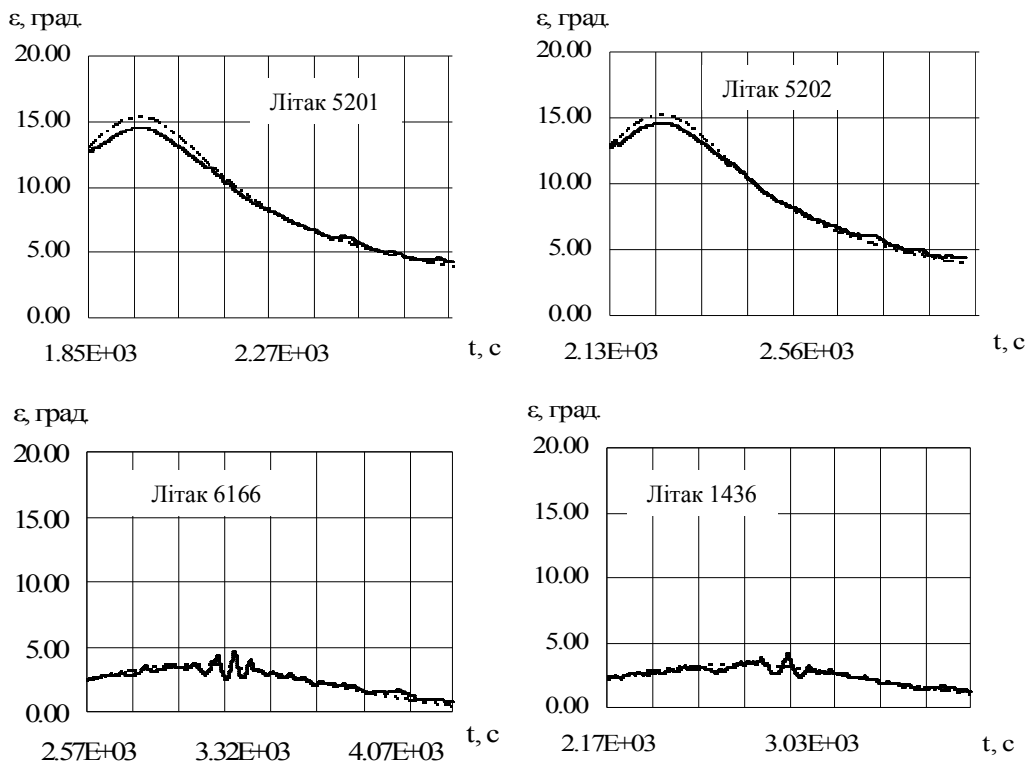


Рис. 7. Результати вимірювання кута місця літаків 5201, 5202, 6166, 1436  
 - - - - система УПР ————— малобазова пасивна TDOA система

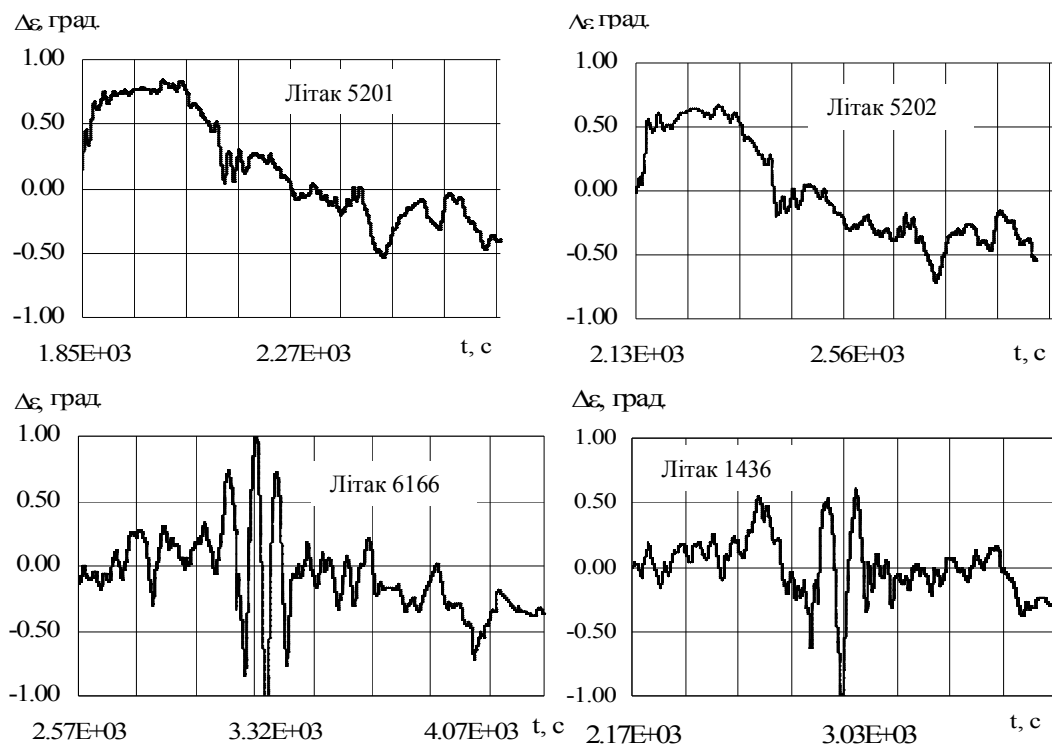


Рис. 8. Абсолютна похибка вимірювання кута місця літаків 5201, 5202, 6166, 1436

Таблиця

## Результати експериментальної оцінки середнього значення несучої частоти сигналу для різних ДРЧВ

№ з/п	ДРЧВ із кодом відповіді	Інтервал часу спостереження $10^3$ с	Кількість відліків	Середнє значення частоти, Гц	$\sigma_{f,3}^2$ Гц <sup>2</sup>	$\sigma_f$ , Гц
1	5201	1,847...2,655	8082	1089967132	233,3	15,3
2	5202	2,132...2,907	7751	1089970905	201,6	14,2
3	6166	2,566...4,350	17839	1090237792	2990,9	54,7
4	6126	3,515...3,830	3151	1090230326	2442,9	49,4
5	6136	4,464...5,495	10354	1090230306	44,2	6,6
6	1436	2,172...3,699	15269	1090234589	7302,4	85,5

## Висновки

За результатами натурних випробувань малобазової пасивної TDOA системи в реальних умовах експлуатації можна зробити наступні висновки:

1. Запропонована методика перевірки суттєво спрощує і здешевлює проведення натурних випробувань і перевірки пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки, дає можливість проводити випробування таких систем на місці їх постійної дислокації без виїзду на спеціально обладнані полігони.

2. У випадку випробування когерентних малобазових пасивних TDOA систем радіоелектронної обстановки слід враховувати негативний вплив на результати вимірювань відбиття від земної поверхні і атмосферної турбулентності.

3. За даними експериментальних досліджень встановлено, що рельєф місцевості в зоні розташування малобазових пасивних TDOA систем не повинен мати дерев і нерівностей по висоті більше 1 м.

## Список літератури

1. Александров А.И. Эксплуатация радиотехнических комплексов / А.И. Александров. – Москва: Сов. радио, 1976. – 280 с.

2. Леонов А.И. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А.И. Леонов. – Москва: Радио и связь, 1990, – 208 с.

3. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д.Бартон, Г.Вард. – Москва: Советское радио, 1976, – 392 с.

4. Декл. Пат. № 73253 UA, G01S 5/22, G01S 13/06, G01S Спосіб вимірювання координат об'єктів, що випромінюють радіочастотні сигнали, та пристрій, що його реалізує / Антонюк В.П., Воронков С.О., Григорєва Л.В., Грозь М.М., Захарко Ю.М., Іванов В.І., Клепфер Є.І., Кротов В.В., Луц В.Д., Мартинів М.С., Проць Б.І., Радзіх Г.С., Чудяк О.Є., Якубовський М.І., Україна. – Заявл. 16.08.2004; Опубл.15.06.2005, Бюл.№6.

5. Синявський А.Т., Антонюк В.П., Грек В.Г., Лобур М.В., Клепфер Є.І. Метод просторової фільтрації сигналу від джерела випромінювання, розташованого над розсіюючою поверхнею // Научно-технічний журнал «Радиоелектроника и информатика». – 2006. – С.16 – 20.

6. V.Antonyuk. The adaptive filtering of mirror Reflections in the passive system with mode TDOA. Proceedings of the International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» TSET 2008. Publishing House of Lviv Polytechnic, p.177-180.

Надійшла до редакції 15.09.2009 р.

Рецензент: доктор технічних наук, професор А.М. Зубков, Академія сухопутних військ, Львів.

## ОРГАНИЗАЦИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОЦЕНКЕ ОСНОВНЫХ ТТХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ

В.П. Антонюк, С.А. Воронков

Приведена методика експериментальної оцінки основних тактико-технічних характеристик пасивних систем контролю радіоелектронної обстановки в умовах відсутності спеціально обладнаних полігонів і спеціальних измерительних средств. Рассмотрены вопросы организации натурального эксперимента для проведения комплексных испытаний пассивной радиотехнической системы по движущимся источникам радиочастотного излучения. Приведены результаты натурных испытаний малобазовой пассивной TDOA системы.

**Ключевые слова:** испытания, малобазовая пассивная система, Time Difference of Arrival (TDOA), тактико-технические характеристики (ТТХ), измерения.

## ORGANIZATION OF FULL-SCALE TEST TO ESTIMATE THE BASIC PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF PASSIVE SYSTEMS

V.P. Antonyuk, S. A. Voronkov

The method of experimental estimation of basic performance characteristics of passive radiomonitoring systems in conditions of absence of specially equipped polygons and special gaging means are discussed. The problem of organization of full-scale test for realization of integrated tests of passive system with using real radio sources is considered. Results of tests shown are short baseline of passive TDOA system.

**Keywords:** tests, short baseline passive system, Time Difference of Arrival (TDOA), performance characteristics, measuring.