

О. В. Онищук<sup>1</sup>  
 В. П. Долгушин<sup>2</sup>  
 Є. С. Ленков<sup>3</sup>  
 В. М. Лоза<sup>2</sup>

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОНОІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КУТА МІСЦЯ МАЛОВИСОТНОЇ ЦІЛІ В РЛС ІЗ ДЗЕРКАЛЬНИМИ АНТЕНАМИ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>2</sup>Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка

<sup>3</sup>Національний авіаційний університет

Оцінено теоретична можливість застосування моноімпульсного методу вимірювання кута місця маловисотної цілі в РЛС із дзеркальними антенами для отримання необхідної точності вимірювання кута місця ( $i$ ,  $отже$ , висоти) цілі в діапазоні «надмалих» кутів.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, маловисотна ціль, діаграма направленості.

### Вступ та постановка задачі

Інтерференція прямого і перевідбитого поверхнею сигналів спотворює діаграму направленості (ДН) антени, створюючи порізаність особливо на малих кутах місця цілі [1]. Це не дозволяє використовувати в РЛС найпростіші одноканальні методи вимірювання кута місця ( $i$ ,  $отже$ , висоти) маловисотних цілей (МВЦ) особливо в діапазоні кутів

$$\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{0,5P},$$

де  $\varepsilon_{\min} = \arcsin(\lambda / 2h_a)$  — кут місця першого інтерференційного «провалу» у зоні видимості РЛС виявлення МВЦ,  $\lambda$  — робоча довжина хвилі,  $h_a$  — висота підйому фазового центру антени.

Для забезпечення вимірювання «надмалих» кутів місця цілі ( $0 < \varepsilon < \varepsilon_{\min}$ ) у літературі [2] запропоновано застосування багатоканальної антенної системи із рознесенням фазових центрів приймальних антен  $A_1$  і  $A_2$ , наведених на рис. 1. При цьому порізаність діаграми направленості відсутня, що, в принципі, дає можливість вимірювати кути місця цілі в діапазоні:  $[0, \arcsin(\lambda / 2h_2)]$ , де  $h_1$  і  $h_2$  — висоти підйому фазового центру антени  $A_1$  і  $A_2$  (див. рис. 1).

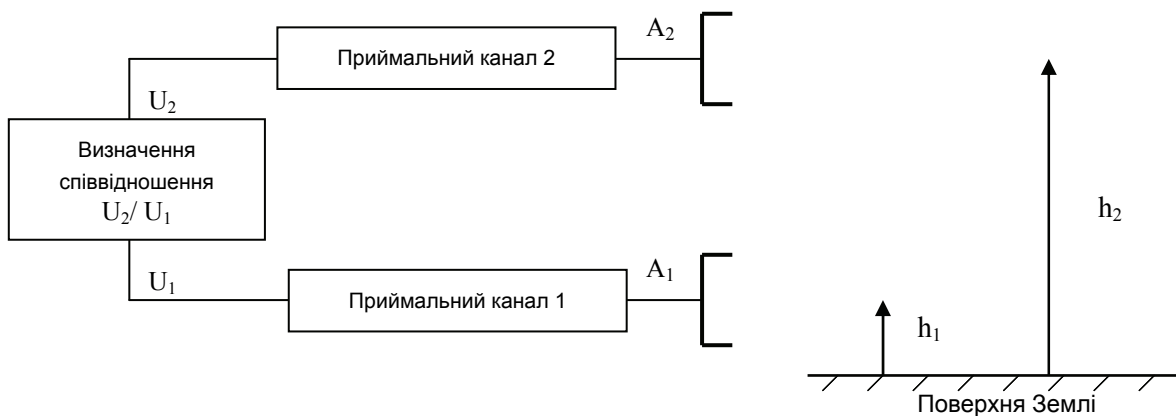


Рис. 1. Розміщення приймальних антен РЛС за реалізації моноімпульсного методу вимірювання кута місця МВЦ

Однак, очікувана якість вимірювання у разі практичного застосування цього методу вимагає попереднього теоретичного дослідження. Для цього в цій статті ставиться задача оцінки точності вимірювання кутових координат цілі в діапазоні «надмалих» кутів запропонованим методом за різних співвідношень сигнал/шум та в залежності від встановлення висот фазових центрів приймальних антен.

### Розв'язання поставленої задачі

На рис. 1 показано розміщення приймальних антен РЛС багатоканальної РЛС. Для спрощення, передавач і його зв'язки з випромінюючими антенами на рис. 1 не показано.  $U_1$  та  $U_2$  — амплітуди сигналів, що приймаються відповідно антенами  $A_1$  і  $A_2$ . Діаграми направленості антен  $A_1$  і  $A_2$  однакові, а їх електричні вісі орієнтовані вздовж лінії горизонту.

Комплексну амплітуду сигналу на виході  $i$ -го каналу прийому ( $i = 1, 2$ ) можна визначити за допомогою співвідношення [2]

$$\dot{U}_i = K_i \cdot U_0 \cdot F_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot F_{\text{прі}}(\varepsilon) \cdot \Phi_{\text{прі}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \exp\{j\phi_{ci}\}, \quad (1)$$

де  $K_i$  — коефіцієнт підсилення  $i$ -го каналу прийому;  $U_0$  — амплітуда сигналу за умови, що ціль знаходиться у максимумі діаграми направленості приймальної антени РЛС у вільному просторі;  $F_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}})$ ,  $F_{\text{пр}}(\varepsilon_{\text{ц}})$  — нормовані діаграми направленості передавальної і приймальної антен в площині вимірювання;  $\Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}})$ ,  $\Phi_{\text{пр}}(\varepsilon_{\text{ц}})$  — інтерференційні множники Землі для передавальної і приймальної антен відповідно;  $\phi_{ci}$  — початкова фаза результуючого сигналу на вході  $i$ -го каналу прийому.

За малих кутів місця модуль коефіцієнта відображення радіохвиль від поверхні Землі і його фази за будь-якою поляризацією, як вже зазначалось, дорівнюють відповідно одиниці і  $180^\circ$ , тому з урахуванням геометрії антенної системи (див. рис. 1), можна записати

$$\Phi_{\text{прі}1}(\varepsilon) = 2 \sin\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right); \quad (2)$$

$$\Phi_{\text{прі}2}(\varepsilon) = 2 \sin\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right). \quad (3)$$

Початкові фази результуючих сигналів на входах приймальних каналів відповідно дорівнюють

$$\phi_{c1} = \phi_c + \frac{2\pi h_1}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}; \quad \phi_{c2} = \phi_c + \frac{2\pi h_2}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}, \quad (4)$$

де  $\phi_{ci}$  — початкова фаза прямого сигналу цілі.

З (1) із урахуванням (2)—(4) випливає, що сигнали на входах приймальних каналів у схемі на рис. 1 мають тільки амплітудні відмінності. Тому для вимірювання «надмалих» кутів місця, в принципі, можна використовувати класичний амплітудний моноімпульсний метод вимірювання кутових координат цілі. За довільних значень висот підйому фазових центрів антен приймальних каналів в РЛС МВЦ алгоритм перерахунку співвідношення амплітуд сигналів в кут місця цілі описується достатньо складним співвідношенням. Однак, якщо висоти підйому фазових центрів антен вибрати так, щоб виконувалась умова  $h_2 = 2h_1$ , алгоритм перерахунку значно спрощується. Дійсно, для  $h_2 = 2h_1$  з урахуванням (1) для амплітуд сигналів на виходах приймальних каналів будемо мати

$$U_1 = K_1 U_0 \cdot F_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot F_{\text{пр}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \sin\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right); \quad (5)$$

$$U_2 = K_2 U_0 \cdot F_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot F_{\text{пр}}(\varepsilon_{\text{ц}}) \cdot \sin\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right). \quad (6)$$

Якщо  $K_1 = K_2$ , то з урахуванням (5) и (6) отримаємо

$$\frac{U_2}{U_1} = 2 \cos\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right). \quad (7)$$

З (7) отримуємо співвідношення для розрахунку кута місця МВЦ у схемі на рис. 1

$$\varepsilon_{\text{ц}} = \arcsin\left\{\frac{\lambda}{2\pi h_1} \cdot \arccos\left(\frac{U_2}{2U_1}\right)\right\}. \quad (8)$$

Однозначне вимірювання кута місця з використанням співвідношення (8) можливо тільки коли  $\varepsilon_{\text{ц}} \leq \arcsin(\lambda/2h_2)$ . Скориставшись методом лінеаризації функції декількох аргументів [3], можна отримати співвідношення, що визначає похибку вимірювання кута місця МВЦ у схемі на рис. 1, якщо  $K_1 \approx K_2$

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{\lambda}{h_2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varepsilon_{\text{ц}} \cdot \frac{\sigma_h^2}{\lambda^2} + \frac{1}{4\pi^2} \cdot \operatorname{ctg}^2\left(\frac{2\pi h}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right) \cdot [1/q_1^2 + 1/q_2^2]}, \quad (9)$$

де  $\sigma_h^2$  — дисперсія висоти підйому фазового центру приймальної антени другого каналу прийому за умови, що рівність  $h_2 = 2h_1$  виконується;  $q_1, q_2$  — співвідношення сигнал/шум (по напрузі) в відповідних каналах прийому з урахуванням інтерференційних втрат, залежність яких від кута місця цілі наведена на рис. 2.

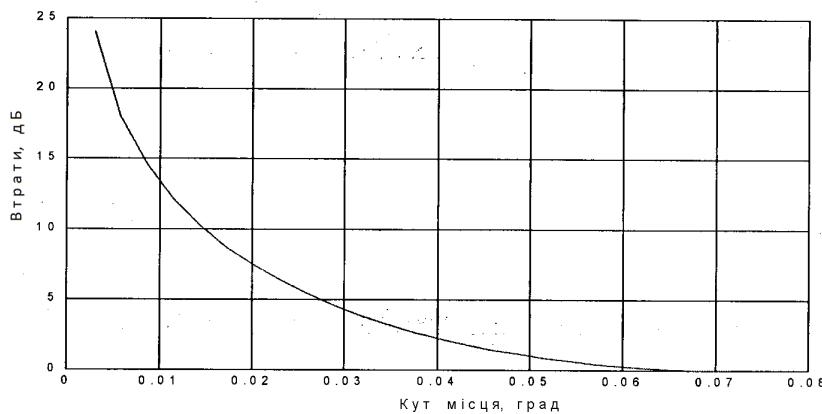


Рис. 2. Інтерференційні втрати як функція кута місця цілі ( $h_2 = 20$  м,  $\lambda = 5$  см)

З рис. 2 видно, що інтерференційні втрати змінюються за експоненційним законом і складають десятки децибел в діапазоні кутів місця цілі менших  $0,02^\circ$ , та одиниці децибел для кутів більших  $0,02^\circ$ . Враховуючи малі значення кутів місця цілі, що вимірюються в схемі на рис. 1, відповідну похибку, зумовлену діапазоном значень  $h_2$ , можна представити [3]

$$\sigma_{\varepsilon(h)} \approx \varepsilon_{\text{ц}} \cdot \sigma_h / \lambda \leq \sigma_h / 2h_2. \quad (10)$$

Із (10) випливає, що складовою  $\sigma_{\varepsilon(h)}$  в розрахунку результуючої похибки вимірювання кута місця МВЦ розглянутим методом, можна знехтувати.

Основний внесок в підсумкову похибку вимірювання кута місця вносять друга та третя складові у співвідношенні (9)

$$\sigma_{\varepsilon(q)} = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{2\pi} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon\right). \quad (11)$$

З урахуванням співвідношень (1)—(3) і геометрії антенної системи

$$q_1 = q_0 \cdot 2 \sin\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right) \cdot \Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}); \quad (12)$$

$$q_2 = q_0 \cdot 2 \sin\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right) \cdot \Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}), \quad (13)$$

де  $q_0 = U_0 / (\sigma_u \sqrt{2})$  — співвідношення сигнал/шум без урахування інтерференційних втрат, за умови, що ціль знаходиться в максимумі діаграми направленості антени у вільному просторі;  $\sigma_u$  — середньоквадратичне значення власних шумів приймальних каналів.

Враховуючи, що для вивчення зондуємого сигналу використовуються обидві антени  $A_1$  та  $A_2$ , інтерференційний множник передавальної антени з висотою підйому фазового центру  $1,5h_1$ , можна представити у вигляді

$$\Phi_{\text{пер}}(\varepsilon_{\text{ц}}) = 2 \sin\left(\frac{3\pi h_1}{\lambda} \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right). \quad (14)$$

На рис. 3 показана залежність відносної похибки вимірювання кута місця МВЦ від кута місця, побудована з урахуванням співвідношень (12)—(14) для  $q_0 = 40$  дБ (суцільна лінія) і  $q_0 = 50$  дБ (пунктирна лінія). Під час розрахунку залежностей, наведених на рис. 3, вважалось, що  $h_1 = 10$  м,  $h_2 = 20$  м.

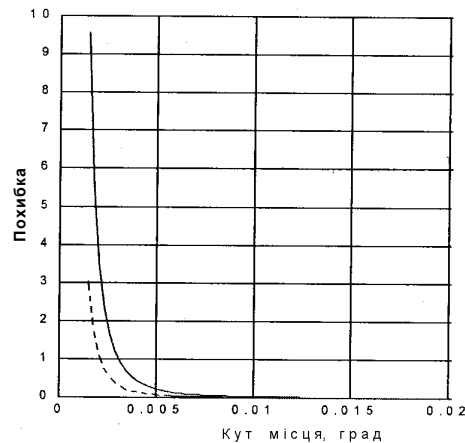


Рис. 3. Вплив співвідношення сигнал/шум на точність вимірювання кута місця ( $h_2 = 20$  м,  $\lambda = 5$  см):  
 —  $q_0 = 40$  дБ; - - -  $q_0 = 50$  дБ

Із аналізу співвідношення (9) та графіків на рис. 3 можна зробити висновок, що, по-перше, вимірювання «надмалих» кутів місця можливо в РЛС сантиметрового діапазону хвиль за наявності значного запасу у співвідношенні сигнал/шум; по-друге, вимірювання кутів місця менших за  $0,025^\circ$  для параметрів РЛС, що використовуються під час розрахунку залежностей на рис. 3, практично неможливо.

Аналогічно виразу (9) може бути отримано співвідношення, що визначає складову похибки вимірювання кута місця цілі (в радіанах) для схеми на рис. 1, зумовленої не ідентичністю похибки коефіцієнтів підсилення приймальних каналів

$$\sigma_{\varepsilon(K)} = \frac{\lambda}{h_2} \cdot \frac{\sigma_K}{K_0 \sqrt{2\pi}} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right), \quad (15)$$

де  $\sigma_K^2$  — дисперсія коефіцієнта підсилення приймального каналу;  $K_0$  — номінальне значення коефіцієнта підсилення кожного з приймальних каналів.

Використовуючи співвідношення (15), можна сформулювати вимоги щодо відносного діапазону коефіцієнтів підсилення приймальних каналів у схемі на рис. 1

$$\frac{\sigma_K}{K_0} = \frac{h_1 \cdot \pi \sqrt{2}}{\lambda \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}\right)^2} \cdot \sigma_{\text{едоп}}, \quad (16)$$

де  $\sigma_{\text{доп}}$  — допустиме значення середньоквадратичної похибки вимірювання кута місця цілі за рахунок відносного діапазону коефіцієнтів підсилення приймальних каналів.

На рис. 4 наведена залежність  $\sigma_{\varepsilon(K)} \cdot h_1 / \lambda$  від відносної похибки встановлення коефіцієнта підсилення приймального каналу, визначеної як  $K_y$

$$\left| K_{\text{уст}} - K_0 \right| / K_0 = K_y.$$

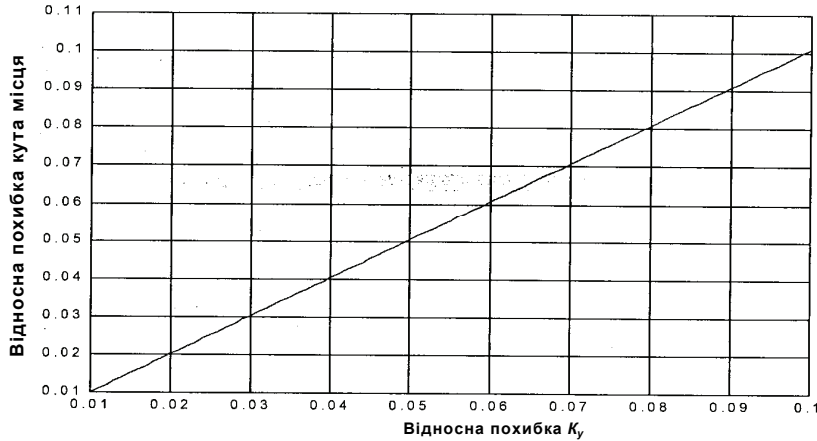


Рис. 4. Залежність відносної похибки вимірювання кута місця МВЦ від відносної похибки встановлення коефіцієнтів підсилення приймальних каналів

З рисунка видно, що відносна похибка вимірювання кута місця МВЦ лінійно збільшується із збільшенням відносної похибки встановлення коефіцієнтів підсилення приймальних каналів. При цьому, вимоги щодо стабільності значень коефіцієнтів підсилення приймальних каналів можуть бути реалізовані за умови  $\lambda \ll h_2$ .

На рис. 5 наведена залежність, що відображає вплив похибки виконання умови  $h_2 = 2 \cdot h_1$  на точність вимірювання кута місця МВЦ при відносному відхиленні  $h_2$  від  $2 \cdot h_1$  рівному  $-0,1$  (суцільна лінія) та  $0,1$  (пунктирна лінія).

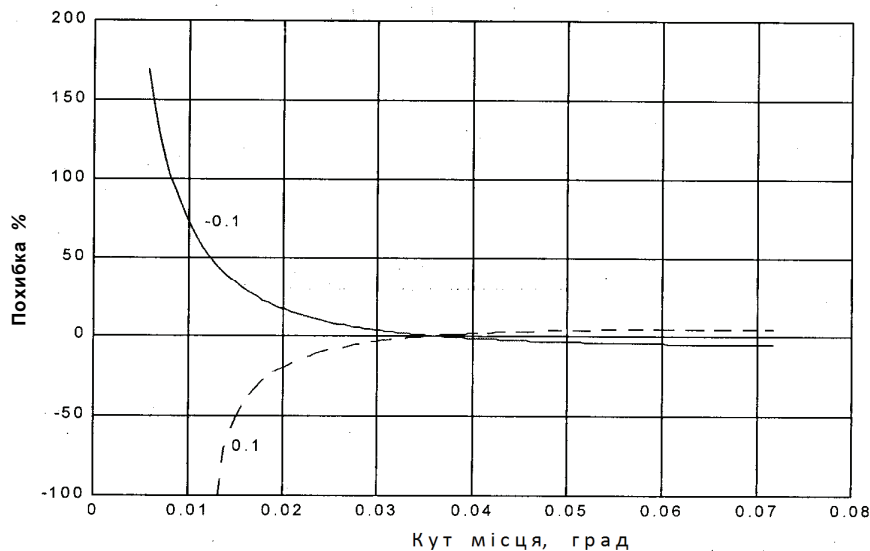


Рис. 5. Вплив похибки виконання умови  $h_2 = 2h_1$  на точність вимірювання «надмалих» кутів місця МВЦ ( $\lambda = 5$  см,  $h_1 = 10$  м) за відносного відхилення  $h_2$  від  $2h_1$ , що дорівнює  $-0,1$  (суцільна лінія) та  $0,1$  (пунктирна лінія)

З рис. 5 видно, що відносне відхилення висоти фазового центра  $h_2$  від номінального значення  $2h_1$ , суттєво погіршує точність вимірювання «надмалих» кутів місця розглянутим способом навіть зі наявності значним запасом у співвідношенні сигнал/шум.

## Висновки

Вимірювання «надмалих» кутів місця маловисотної цілі моноімпульсним методом є можливим в РЛС сантиметрового діапазону хвиль за наявності значного запасу у співвідношенні сигнал/шум (більше 50 дБ). Вимірювання кутів місця менших за  $0,025^\circ$  практично неможливо. Навіть за наявності значного запасу у співвідношенні сигнал/шум, можливості розглянутого методу вимірювання «надмалих» кутів місця цілі обмежені досягнутою точністю встановлення висот фазових центрів приймальних антен РЛС.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Родс Д. Введение в моноимпульсную радиолокацию : пер. с англ. / Д. Родс ; под ред. Л. Д. Бахраха. — М. : Сов. Радио, 1960. — 364 с.
2. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман. — М. : Сов. Радио, 1970. — 560 с.
3. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн / Я. С. Шифрин. — М. : Сов. Радио, 1970. — 248 с.
4. Сколник М. Справочник по радиолокации : в 4 т. ; пер. с англ. / М. Сколник. — М. : Сов. Радио, 1976. — Т. 1. — 456 с.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.03.2014

**Онищук Олег Володимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: [oleh\\_onyshchuk@mail.ru](mailto:oleh_onyshchuk@mail.ru).

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Долгушин Віктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник науково-дослідного центру;

**Ло́за Віталій Миколайович** — канд. техн. наук, науковий співробітник науково-дослідного центру.

Військовий інститут, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ;

**Ленков Євген Сергійович** — канд. техн. наук, заступник начальника авіаційного центру ЕК.

Національний авіаційний університет, Київ

**O. V. Onyshchuk**<sup>1</sup>

**V. P. Dolhushyn**<sup>2</sup>

**E. S. Lenkov**<sup>3</sup>

**V. M. Loza**<sup>2</sup>

## Estimation of possibility of using the single-pulse method of measurement of elevation angle of low-altitude target in radar station with radar reflector antennas

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>2</sup>Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University

<sup>3</sup>National Aviation University

*The theoretical possibility of using the single-pulse method of measurement of elevation angle of low-altitude target in radar station reflector antennas to obtain the desired elevation angle measurement accuracy (and therefore height) of target in the range of «ultrasmall» angles is estimated in the paper.*

**Keywords:** radar station, low-altitude target, directivity pattern.

**Onyshchuk Oleg V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television;

**Dolhushyn Viktor P.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor., Senior Researcher of Research Center;

**Lenkov Evgen S.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Aviation Center;

**Loza Vitalii N.** — Cand. Sc. (Eng.), Research Assistant of Research Center.

**О. В. Онищук**<sup>1</sup>  
**В. П. Долгушин**<sup>2</sup>  
**Е. С. Ленков**<sup>3</sup>  
**В. Н. Лоза**<sup>2</sup>

## **Оценка возможности применения моноимпульсного метода измерения угла места маловысотных целей в РЛС с зеркальными антеннами**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

<sup>2</sup>Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

<sup>3</sup>Национальный авиационный университет

*Оценивается теоретическая возможность использования моноимпульсного метода измерения угла места маловысотной цели в РЛС с зеркальными антеннами для получения требуемой точности измерения угла места (и, следовательно, высоты) цели в диапазоне «сверхмалых» углов.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, маловысотная цель, диаграмма направленности.

**Онищук Олег Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: oleh\_onyschuk@mail.ru;

**Долгушин Виктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра;

**Ленков Евгений Сергеевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника авиационного центра ЕК;

**Лоза Виталий Николаевич** — канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра