

О. В. Андреев, П. П. Топольницький, В. В. Ципоренко, Є. О. Андреева

## ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ З АЕРОКОСМІЧНОГО НОСІЯ

*Для підвищення кутового розділення при дистанційному зондуванні Землі широкого поширення набув пасивний синтез апертури антени за сигналами зовнішніх джерел радіовипромінювання. На відміну від класичних активних методів синтезу апертури антени, які передбачають наявність даних про параметри опорного сигналу, при пасивному методі синтезу апертури антени ця інформація є апріорно невідомою, оскільки параметри прийнятих радіосигналів заздалегідь невідомі. Похибки у формуванні опорної функції безпосередньо впливають на точність визначення дальності до джерела радіовипромінювання. Запропоновано підхід до визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання, який базується на різницево-далекомірних вимірах і не вимагає формування опорного сигналу.*

**Ключові слова:** космічний апарат, джерело радіовипромінювання, різницево-далекомірні виміри, визначення місцезнаходження.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з напрямків використання космічних технологій є забезпечення керівництва збройних сил розвідувальною інформацією. Підвищення ефективності космічних засобів розвідки може ґрунтуватися на комплексному застосуванні технічних засобів та виконанні завдань моніторингу в будь-який час доби та за складних метеорологічних умов [1], що може бути забезпечено шляхом огляду земної поверхні з космічних апаратів (КА) в радіодіапазоні. При цьому антена опромінює земну поверхню і приймає відбитий сигнал на порівняно великій ділянці траєкторії руху носія [1]. Принципи побудови бортових радіолокаційних станцій (РЛС), які використовують дану ділянку траєкторії як штучний (синтезований) розкрит антен, що дозволяє істотно збільшити їх роздільну здатність за азимутом, розглянуті, наприклад, у [2–4]. Для підвищення кутового розділення інтерферометричних систем при дистанційному зондуванні Землі широкого розповсюдження набув пасивний синтез апертури антени за сигналами зовнішніх джерел радіовипромінювання (ДРВ). При цьому за сигнали зовнішніх джерел пропонується використовувати власне теплове випромінювання Землі або відбиті від її поверхні сигнали систем глобального позиціонування [5, 6]. У [7] запропоновано використовувати для оцінювання дальності до РЛС виміри кутового положення щодо носія. Однак триангуляційний метод оцінювання місця розташування на великих відстанях, для яких характерно розміщення приймальної антени на КА, як відомо, має досить низьку точність. У [8] розроблено метод визначення дальності до ДРВ з рухомої платформи, який базується на обчисленні модуля кореляційного інтегралу між сигналом ДРВ, що приймається в процесі руху носія антени відносно джерела, розташованого в певній точці земної поверхні, і опорною функцією на інтервалі синтезування. На відміну від класичних активних методів синтезу апертури антени, які

передбачають наявність інформації про параметри опорного сигналу, при пасивному методі параметри прийнятих радіосигналів заздалегідь невідомі. Похибки формування опорної функції безпосередньо впливають на точність визначення дальності до ДРВ відносно аерокосмічного носія. Тому розробка методу оцінювання дальності до ДРВ з аерокосмічного носія, який не вимагає формування опорного сигналу, в умовах апріорної невизначеності місцезнаходження ДРВ і параметрів випромінюваного сигналу є *актуальним завданням*. Отже, метою статті є розробка методу оцінювання місцезнаходження ДРВ з аерокосмічного носія, що не вимагає формування опорного сигналу.

**Виклад основного матеріалу. Постановка завдання та його розв'язання.** Нехай сигнал, що випромінюється наземним ДРВ, є немодульованим і безперервним за часом коливання радіочастотного діапазону.

За рахунок руху носія ДРВ, розташоване в точці  $A(0; y; 0)$  земної поверхні (рис. 1), створює на вході приймача сигнал, зміна якого в часі може бути описана таким чином:

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_o(t - \tau) + \varphi_o), \quad (1)$$

де  $U(t)$  – значення обвідної радіосигналу;

$\omega_o$  – частота сигналу;

$\varphi_o$  – початкова фаза сигналу;

$\tau$  – затримка радіосигналу при розповсюдженні від ДРВ до КА.

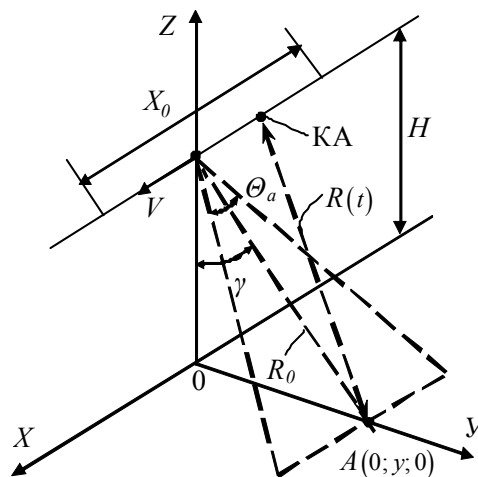


Рис. 1

Затримку радіосигналу при розповсюдженні від ДРВ до входу приймача, який рухається зі швидкістю  $V$ , визначимо таким чином:

$$\tau = \frac{R(t)}{c}; \quad R(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2 + H^2},$$

де  $x(t) = V \cdot t$  – поточна координата носія вздовж осі  $X$ ;

$c$  – швидкість світла;

$H$  – висота носія.

Тоді вираз (1) може бути перетворений до такого вигляду:  
 $u(t) = U(t) \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi R(t)}{\lambda} + \varphi_0\right)$ . Довжина відрізка шляху носія, упродовж якого приймається сигнал ДРВ, що має довжину хвилі  $\lambda$ , обмежується шириною діаграми спрямованості (ДС)  $\theta_a$  бортової антени  $X_0 \approx R_0 \cdot \Theta_a$ . Значення  $R_0$  відповідає мінімальній відстані між носієм і ДРВ. Згідно з [3]  $R(t) \approx R_0 + \frac{V^2 t^2}{2R_0}$ , отже, маємо

$$u(t) = U(t) \cos\left(\omega_0 t - \pi V^2 t^2 / (\lambda R_0) + \psi\right), \quad (2)$$

де  $\psi = \varphi_0 - \frac{2\pi R_0}{\lambda}$  – невідома початкова фаза прийнятого радіосигналу.

Як впливає з (2), траєкторний сигнал  $u(t)$  на інтервалі спостереження  $T_H = X_0 / V$  є модульованим за фазою  $\Phi(t) = -\frac{\pi V^2 t^2}{\lambda R_0} + \Psi$  і за частотою

$F(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{V^2 t}{\lambda R_0} = -\frac{V_r(t)}{\lambda}$ ,  $|t| \leq T_H / 2$  відповідно до зміни поточної відстані між носієм і ДРВ.

Нехай на інтервалі спостереження з деяким кроком  $T_0$  у дискретні моменти часу  $t_p = pT_0$ ,  $p = 0, \dots, N$ , де  $N = \text{int}\left\{\frac{T_H}{T_0}\right\}$ , отримано значення частоти прийнятого сигналу. Визначити значення частоти сигналу можна одним з відомих способів, наприклад, на основі акустооптичного приймача Брегга або приймача зі стисканням сигналу [9].

Функціональна залежність зміни частоти на інтервалі спостереження може бути описана поліномом першого ступеня  $F(t_p) = a_0 + a_1 t_p$  [9]. Значення коефіцієнтів полінома за результатами дискретних вимірів частоти сигналу отримується на основі методу найменших квадратів. Маючи функціональну залежність  $F(t)$ , визначимо дві лінії положення (див. рис. 2), які відповідають двом різницям дальностей [9]:

$$\Delta R_1 = R_1 - R_2 = \frac{c}{f_0} \int_{t_0}^{t_{N/2}} F(t) dt \quad \text{та} \quad \Delta R_2 = R_3 - R_2 = \frac{c}{f_0} \int_{t_{N/2}}^{t_N} F(t) dt .$$

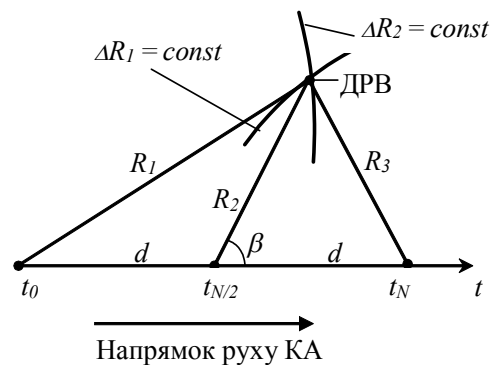


Рис. 2

Точка перетину ліній положення визначатиме місце розташування ДРВ на земній поверхні. Можна показати, що відносно КА ця точка однозначно визначається двома координатами:  $R_2 = \frac{2d^2 - \Delta R_1^2 - \Delta R_2^2}{2(\Delta R_1 + \Delta R_2)}$ ;  $\beta = \arccos\left(\frac{\Delta R_1^2 - \Delta R_2^2 + 2R_2(\Delta R_1 - \Delta R_2)}{4dR_2}\right)$ .

Згідно з постановкою завдання досліджень координати ДРВ на земній поверхні та параметри випромінюваного ним радіосигналу є апіорі невідомими. При цьому розмір смуги огляду залежить від висоти носія, ширини ДС бортової антени і кута відхилення її осі від надира. Оцінимо можливі межі зміни частоти сигналу на вході приймального пристрою. Вважатимемо, що висота польоту КА 650 км,  $\theta\alpha = 0,1$  рад, кут  $\gamma = 45^\circ$ , а ДРВ знаходиться в точці перетину середини ДС з поверхнею Землі. Тоді відстань від проекції КА на поверхню Землі до ДРВ –  $y = 650$  км. Зміна поточної відстані від КА до ДРВ на інтервалі спостереження наведена на рис. 3а. При цьому зміну частоти Доплера для випадку, коли ДРВ випромінює безперервний сигнал на частоті 3 ГГц, наведено на рис. 3б. Як видно, зміна частоти сигналу на інтервалі спостереження дійсно відповідає лінійному закону. Проте на практиці отримана функціональна залежність  $F(t)$  істотно залежатиме від точності дискретних вимірів частоти.

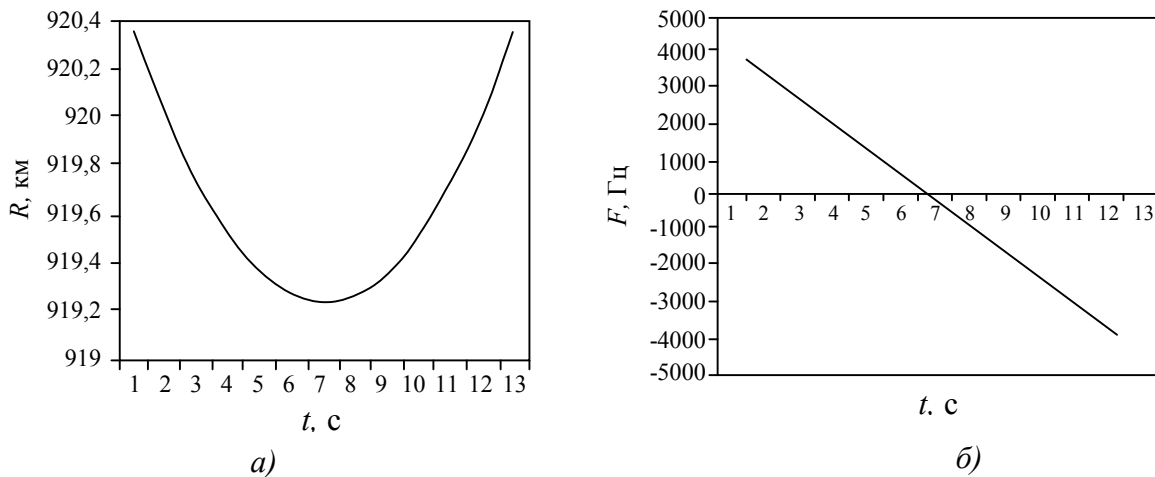


Рис. 3

Оцінимо можливість застосування запропонованого методу для різних середньоквадратичних відхилень (СКВ) похибок виміру частоти, розподілених за нормальним законом. Як критерій можливості застосування методу доцільно використати максимальні значення похибок визначення місцеположення ДРВ відносно КА, оцінку яких будемо проводити за сорока шумовими реалізаціями з надійною ймовірністю 0,95. У табл. 1 наведено максимальні значення похибок визначення похилої дальності й азимута ДРВ відносно КА за результатами моделювання, а також похибки визначення місцеположення ДРВ на площині в координатах "горизонтальна дальність – шляхова дальність" та значення СКВ радіальної похибки місцеположення, які відповідають максимальним значенням похибок визначення похилої дальності й азимута ДРВ відносно КА. Аналіз наведених даних показує, що запропонований метод оцінювання місцеположення ДРВ, що базується на різницево-далекомірних вимірах, дозволяє визначити місцеположення ДРВ з аерокосмічного носія в умовах апіорної невизначеності

параметрів сигналу, що приймається. При цьому підвищення на порядок СКВ похибок виміру частоти Доплера призводить до такого ж підвищення СКВ радіальної похибки визначення місцеположення ДРВ.

Таблиця 1

## Результати моделювання

СКВ похибок виміру частоти, Гц	Максимальне значення похибок визначення місцеположення				
	Похила дальність, м	Азимут, град	Горизонтальна дальність, м	Шляхова дальність, м	СКВ радіальної похибки, м
100	2569	0,014	3633	224,5	3640
1000	23117	0,113	32692	1819	32742

**Висновки.** Запропоновано підхід до оцінювання місцеположення ДРВ з аерокосмічного носія в умовах апіорної невизначеності місця його розташування і параметрів сигналу, що випромінюється. Метод базується на визначенні параметрів функціональної залежності частоти Доплера за результатами вимірів частоти на інтервалі спостереження. Наведено аналітичні вирази методу оцінювання місцеположення ДРВ відносно КА на основі різницево-далекомірних вимірів. Проведене моделювання показало, що запропонований підхід дозволяє визначити місцеположення ДРВ з аерокосмічного носія в умовах апіорної невизначеності параметрів сигналу, що приймається. Як недолік методу можна зазначити досить високі вимоги до точності отримання вимірів частоти Доплера на інтервалі спостереження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дистанционное зондирование Земли из космоса: получение и использование информации : монография. / Е. И. Бушуев, В. И. Волошин, Е. И. Капустин и др. ; под. общ. ред. С. П. Мосова. – Днепропетровск : Стилус, 2012. – 320 с.
2. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др. ; под ред. Ю. А. Мельника. – М. : Сов. Радио, 1980. – 262 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин и др.; под ред. В. Т. Горяинова. — М. : Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Фалькович С. Е. Радиотехнические системы дистанционного зондирования : учеб. пособ. / С. Е. Фалькович, В. К. Волосюк, О. А. Горбуненко. – Х. : ХАИ, 2002. – 157 с.
5. Сидоров И. А. Блок обработки информации для радиометрических систем с синтезированием апертуры / И. А. Сидоров // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем : сб. науч. трудов I Междунар. науч.-практ. конф. – М. : МГТУ МИРЭА, 2013. – С. 39–42.
6. Волосюк В. К. Многопозиционная РЛС с синтезированной апертурой / В. К. Волосюк, А. В. Ксендзук, И. А. Евсеев // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2003. – № 4. – С. 74–78.
7. Белик Б. В. Метод оценивания координат подвижного источника радиоизлучения в бортовой РЛС / Б. В. Белик, Д. Н. Сузанский, В. С. Чернов // Актуальные проблемы и

перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем : сб. науч. трудов I Междунар. науч.-практ. конф. – М. : МГТУ МИРЭА, 2013. – С. 8–12.

8. Андреев О. В Алгоритм пасивного синтезування апертури антени з рухомої платформи / О. В. Андреев, П. П. Топольницький // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. – № 9. – С. 85–92.

9. Радиотехнические системы : учеб. для вузов / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высшая школа, 1990. – 496 с.

Подано 15.11.2017

**А. В. Андреев, П. П. Топольницький, В. В. Ципоренко, Е. А. Андреева**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НОСИТЕЛЯ**

*Для повышения углового разрешения при дистанционном зондировании Земли широко используется пассивный синтез апертуры антенны по сигналам внешних источников радиоизлучения. В отличие от классических активных методов синтеза апертуры антенны, предполагающих наличие информации о параметрах опорного сигнала, при пассивном методе данная информация априорно неизвестна, так как параметры принятых радиосигналов заранее неизвестны. Ошибки в формировании опорной функции непосредственно влияют на точность определения дальности до источника радиоизлучения. Предложен подход по определению местоположения источника радиоизлучения, который базируется на разностно-дальномерных измерениях и не требует формирования опорного сигнала.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, источник радиоизлучения, разностно-дальномерные измерения, определение местонахождения.

**O. V. Andreyev, P. P. Topolnycky, V. V. Tsyurenko, Y. O. Andreyeva**

### **DETERMINATION OF THE LOCATION OF THE SOURCE OF RADIO EMISSION FROM AN AEROSPACE CARRIER**

*In order to increase the angular separation during the Earth remote sensing, a wide-spread distribution passive synthesis of antenna aperture was obtained by signals from external a radio emission sources. In contrast to the classical active methods for synthesizing an aperture antenna, which assume information about the parameters of the reference signal, with the passive antenna aperture synthesis method, this information is a priori unknown, since the parameters of the received radio signals are not known in advance. Errors in the formation of the reference function directly affect the accuracy determining the range to the radio emission source. The approach to determining the location of the radio emission source, which is based on difference-distance measurements and does not require the formation reference signal, is proposed.*

**Keywords:** spacecraft, source of radio emission, difference-range measurements, location determination.