

DOI: 10.18372/2310-5461.67.20045
УДК 621.396.96

І. Г. Прокопенко, д-р техн. наук, проф.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0003-4169-3774>

email: ihor.prokopenko@npp.kai.edu.ua;

О. І. Ільїн,

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-9025-8915>

email: 5196906@stud.kai.edu.ua

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ РАДІОДАЛЕКОМІР З ШУМОПОДІБНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ЗОНДУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ

Вступ та постановка проблеми

Сучасна авіаційна навігація і системи автоматичного управління польотом все більшою мірою покладаються на точні дані про висоту і відстань до поверхні або об'єктів Радіодалекоміри, є невід'ємними частинами цих вимірювальних комплексів.

Для безпечного і точного приземлення літального апарату необхідні мінімальні похибки вимірів дальності, особливо на малих висотах, де помилки можуть призвести до аварійних ситуацій. Поліпшення точності знижує ризик неправильної оцінки відстані та підвищує безпеку польотів [1–5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У реальних умовах на виміри дальності впливають перешкоди, шум тощо. [5, 6, 7]. Точні вимірювання допомагають компенсувати ці ефекти, забезпечуючи коректне розпізнавання об'єктів та відстаней до них навіть за несприятливих умов.

Автономні літальні апарати (БПЛА) потребують високої точності далекомірів для навігації та посадки [6, 8]. Підвищення точності розширює можливості автоматизації, знижує людський фактор та дозволяє застосовувати БПЛА у складних умовах.

Сучасні методи обробки даних, які включають обробку нейромережами, ефективні лише при високій точності радіолокаційного вимірювання [9, 10, 11]. Помилки в початкових вимірюваннях суттєво знижують ефективність розпізнавання цілей та можуть призвести до помилок у траєкторіях.

Таким чином, існує необхідність розробки нових або удосконалення існуючих методів обробки радіолокаційних сигналів з метою збільшення точності вимірювання дальності в радіодалекомірах.

У публікаціях [12, 13] розглядаються підходи до кореляційної обробки сигналів. Зокрема, зазначається, що кореляційна обробка широкосмугових сигналів є одним із найбільш перспективних

напрямків у розвитку методів радіолокації, оскільки вона дозволяє значно покращити роздільну здатність і точність визначення дальності. Ці тенденції свідчать про значний потенціал кореляційних методів у створенні нових радіолокаційних систем з підвищеними характеристиками.

Мета статті

Метою статті є розробка методу радіолокаційного вимірювання дальності, застосування якого дозволить підвищити точність вимірювання. Метод планується використовувати у низьколітаючих апаратах, для яких точна оцінка висоти є особливо важливою в умовах нерівностей рельєфу. У рамках статті проводиться аналіз структурної схеми запропонованої системи, моделювання сигнальних характеристик та оцінка точнісних параметрів.

Основні принципи роботи радіодалекомірів

Принцип роботи радіодалекомірів засновано на властивості радіохвилі відбиватися від об'єктів та розповсюджуватися у просторі прямолінійно і з постійною швидкістю [14].

Під час вимірювання дальності фіксують час випромінювання зондувального коливання і момент прийому сигналу, відбитого від об'єкту, та порівнюють часову затримку між цими подіями. Час проходження від антени до землі та від землі до антени однакові ($t_{\text{прямий}} = t_{\text{відбитий}} = t_{\text{п}}$, де $t_{\text{п}}$ – це час проходження сигналу до об'єкту або від об'єкту до приймальної антени), тобто час затримки зондувального сигналу дорівнює:

$$t_3 = t_{\text{прямий}} + t_{\text{відбитий}} = 2 \cdot t_{\text{п}}.$$

Радіосигнали, які використовуються в радіолокаційних станціях, розповсюджуються у просторі з постійною швидкістю світла $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с прямолінійно. Час затримки τ визначає відстань до цілі D , яка розраховується за формулою:

$$D = \frac{c \cdot t_3}{2}.$$

Таким чином, в основі радіолокаційного вимірювання дальності лежить визначення часу затримки τ .

Радіолокаційне вимірювання радіальної швидкості об'єкту V_r (рис. 1) засновано на ефекті Доплера. Ефект Доплера – це фізичне явище, у якому частота відбитого радіосигналу змінюється залежно від відносної швидкості руху об'єкта-цілі вздовж лінії візування радару. Ця зміна частоти називається Доплерівським зсувом f_d .

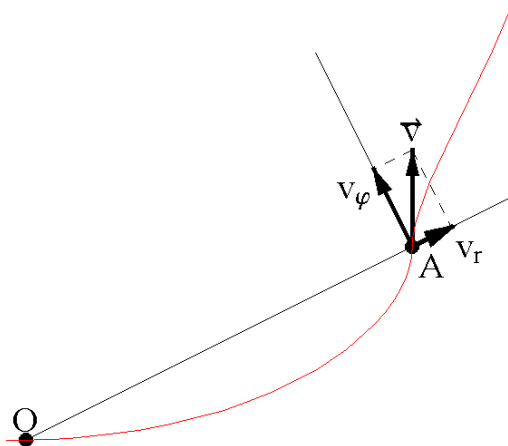


Рис. 1. Складові вектора швидкості

На рис. 1 О – радар; А – об'єкт, за яким ведеться спостереження; V – вектор швидкості об'єкту; V_ϕ – тангенціальна складова вектора швидкості; V_r – радіальна складова вектору швидкості.

Доплерівський зсув f_d визначає радіальну швидкість об'єкта V_r , яка розраховується за формулою:

$$V_r = \frac{f_d \cdot c}{2f_{c0}}$$

Де f_{c0} – несуча частота зондувального сигналу.

Поширені радіолокаційні методи вимірювання дальності

Розглянемо основні методи вимірювання, структурні схеми радіодалекомірів, відзначимо їх особливості, переваги та недоліки.

Імпульсний радіодалекомір

Метод вимірювання дальності за амплітудою (імпульсний) ґрунтується на прямому визначенні часу затримки радіоімпульсу, що відбивається від об'єкту, відносно випроміненого зондувального сигналу [14, 15].

У радіолокаційних станціях, що застосовують імпульсний метод вимірювання висоти з використанням однієї антени, існує мінімальна відстань до цілі, яку вони можуть зафіксувати, так звана «мертва зона» [14, 15]. Це пояснюється тим, що антенний перемикач відключає приймач від антени на час тривалості імпульсу.

Після завершення випромінювання зондувального сигналу перемикачу потрібен певний час для відновлення працездатності. Внаслідок цього мінімальна дальність до цілі, доступна для вимірювання імпульсним радіодалекоміром, визначається за формулою [14, 15]:

$$D_{min} = 0,5c(\tau_i + t_{відн}),$$

де τ_i – тривалість імпульсів, $t_{відн}$ – час відновлення чутливості приймача.

Для вимірювання великих дальностей застосовують імпульси з довгою тривалістю, тоді як для малих дальностей – імпульси короткої тривалості. До переваг імпульсного методу вимірювання висоти належать простота конструкції та наявність роздільної здатності по дальності. Водночас, значна мінімальна дальність, що обумовлена тривалістю зондувальних імпульсів та часом перехідних процесів у антенному перемикачі, обмежує можливість застосування амплітудного радіодалекоміра для вимірювання малих дальностей.

Фазовий радіодалекомір

Принцип фазового методу вимірювання дальності полягає у порівнянні фазових зсувів між сигналом, що передається, та сигналом, який відбивається від цілі [16, 17].

Різниця фаз між цими сигналами безпосередньо пропорційна відстані до об'єкта і визначається відповідною формулою [2]:

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda} D - \psi_{від} - \psi_{рлс},$$

де λ – довжина хвилі, $\psi_{від}$ – фазовий зсув, який виникає при відбитті радіохвилі від цілі, $\psi_{рлс}$ – відомий фазовий зсув, який виникає у пристроях радіолокаційної станції.

Фазовий метод вимірювання висоти має ряд переваг, серед яких – низькі вимоги до потужності випромінювання та відносна простота конструкції апаратури. Проте суттєвим недоліком цього методу є відсутність роздільної здатності по дальності, що ускладнює точне визначення положення об'єктів, розташованих близько один до одного.

Частотний радіодалекомір

У авіації для вимірювання висоти часто застосовують частотний метод, який ґрунтується на визначенні зміни частоти передавача протягом часу проходження зондувального сигналу від радіолокаційної станції до цілі та назад [18, 19]. Через технічні обмеження неможливо реалізувати безперервну зміну частоти, тому на практиці використовують різні види періодичної частотної модуляції, зокрема симетричні та несиметричні пилкоподібні закони, а також синусоїдальну модуляцію. Частотний метод дозволяє уникнути «мертвої зони», характерної для імпульсних методів.

Зміна частоти передавача протягом часу проходження зондувального сигналу від радіолокаційної станції до об'єкту та назад (частота биття F_6) (рис. 2) прямо пропорційна відстані до цілі D і визначається за формулою:

$$F_6 = F_{\text{вип}} - F_{\text{від}} = \frac{4F_M \Delta f_M}{c} D,$$

де F_M – частота модуляції, Δf_M – девіація частоти передавача.

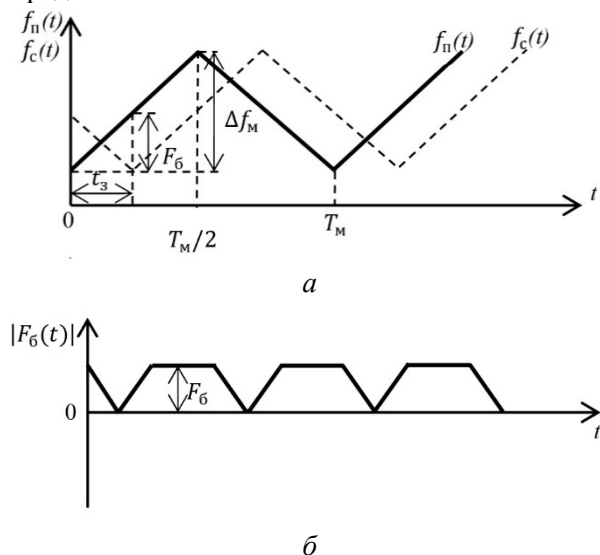


Рис. 2. Зміна частот випромінених та відбитих сигналів при симетричному пилкоподібному законі модуляції частоти (а) і зміна частоти биття (б)

Відстань до цілі при використанні частотного методу вимірювання визначається за наступною залежністю:

$$D = \frac{cF_6}{4F_M \Delta f_M}.$$

Частотний метод ефективно застосовується для вимірювання малих висот, що є його важливою перевагою. Проте суттєвим обмеженням такого радіовисотоміра є потреба у забезпеченні високої лінійності зміни частоти сигналу [18, 19]. Недотримання цієї умови може призводити до зниження точності вимірювань і ускладнює реалізацію системи, що вимагає використання складної та дорогої апаратури для стабілізації частотної модуляції.

Кореляційний радіодалекомір

У працях [12, 13] вказується, що впровадження широкосмугових зондувальних сигналів при кореляційній обробці дозволяє покращити роздільну здатність та точність вимірювання дальності. Структурна схема радіодалекоміру, що реалізує ці принципи, наведена на рис. 3. Ця структурна схема ілюструє послідовність обробки сигналу від генерації до кінцевих вимірювань дальності та радіальної швидкості.

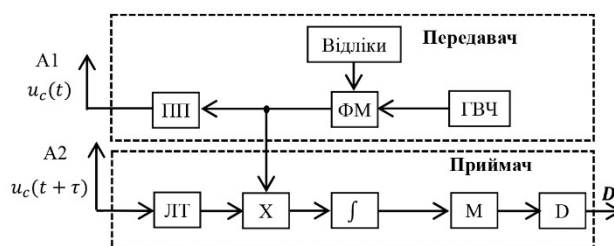


Рис. 3. Структурна схема кореляційного радіодалекоміра

На рис. 3 А1 – передавальна антена; А2 – приймальна антена; ПП – підсилювач потужності; ФМ – фазовий модулятор; ГВЧ – генератор високої частоти, що виробляє гармонічне коливання з несучою частотою f_{c0} ; ЛТ – лінійний тракт приймача; X – перемножувач; I – інтегратор; М – вимірювач піків функції; D – блок обчислення дальності до об'єкта.

Зондом є сигнал з шумоподібною модуляцією виду:

$$u_c(t) = U_{c0} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{c0}t + \beta_0 p_t),$$

де U_{c0} – амплітуда сигналу; f_{c0} – несуча частота; $\beta_0 = 1$ – індекс модуляції; p_t – число з масиву випадкових чисел p , яке обирається відповідно до відліку часу t .

Сигнал $u_c(t)$ формується за допомогою ГВЧ, відліків p та фазового модулятора (рис. 4).

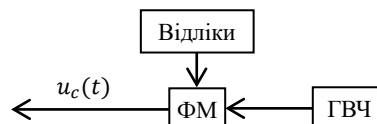


Рис. 4. Формування зондувального сигналу

Спектр зондувального сигналу зображено на рис. 5.

Після підсилення в підсилювачі потужності сигнал $u_c(t)$ за допомогою антени А1 випромінюється у простір, доходить до спостережуваного об'єкта, відбивається від нього, після чого надходить у приймальну антену А2 (рис. 6).

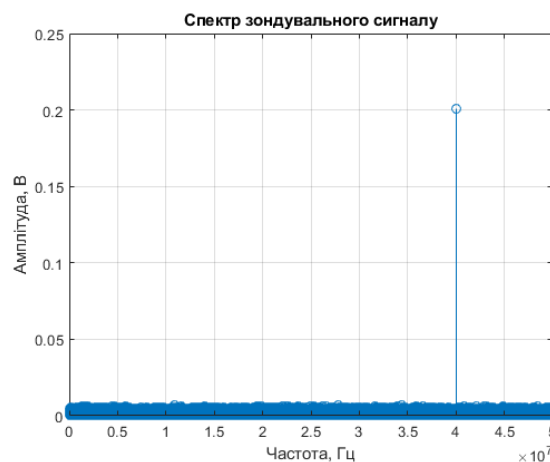


Рис. 5. Спектр зондувального сигналу

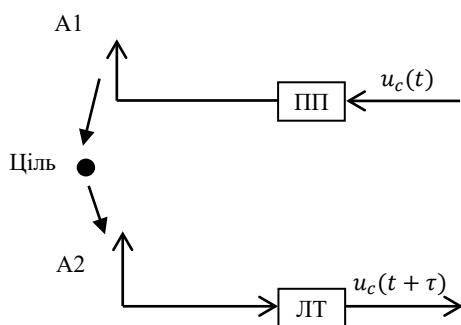


Рис. 6. Формування відбитого сигналу $u_c(t + \tau)$

Відбитий від об'єкту сигнал запишеться у вигляді:

$$u_c(t + \tau) = U_c \cdot \sin(2\pi \cdot (f_{c0} + f_d) \cdot (t + \tau) + \beta_0 p_{t+\tau}),$$

де U_c – амплітуда відбитого сигналу; τ – часова затримка відбитого сигналу; f_d – доплерівський зсув частоти; $p_{t+\tau}$ – число з масиву випадкових чисел p , яке обирається відповідно до відліку часу $t + \tau$.

Після проходження лінійного тракту відбитий сигнал $u_c(t + \tau)$ подається на вхід перемножувача, де помножується на зондувальний сигнал $u_c(t)$.

На виході інтегратора формується взаємкореляційна функція сигналів $u_c(t)$ та $u_c(t + \tau)$, що зображена на рис. 7:

$$g(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u_c(t) \cdot u_c(t + \tau) dt.$$

На рис. 7 пік відповідає об'єкту із затримкою $\tau_1 = 0,2$ мс та нульовою радіальною швидкістю ($f_d = 0$). Вимірювач піків M фіксує значення затримки, що відповідає максимуму взаємкореляційної функції, і передає його до блоку обчислення дальності D .



Рис. 7. Взаємкореляційна функція

Ненульовий Доплерівський зсув частоти ($f_d \neq 0$) у відбитому сигналі $u_c(t + \tau)$ ускладнює визначення часової затримки τ . Зі збільшенням зсуву Доплера пік взаємкореляційної функції

зникає, що робить вимірювання часової затримки неможливим. На рис. 8, 9 та 10 відповідно зображені взаємкореляційні функції об'єктів з зсувами Доплера $f_{d1} = 5$ Гц, $f_{d2} = 15$ Гц, $f_{d3} = 80$ Гц.

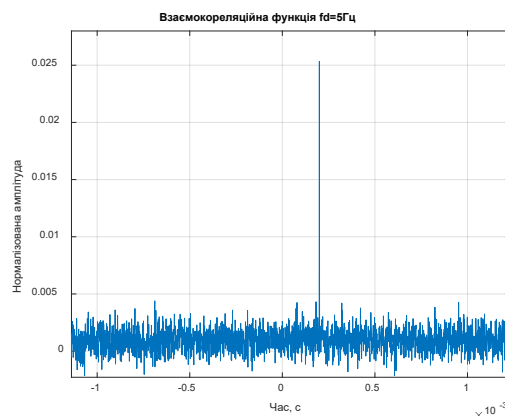


Рис. 8. Взаємкореляційна функція з зсувом Доплера $f_{d1} = 5$ Гц

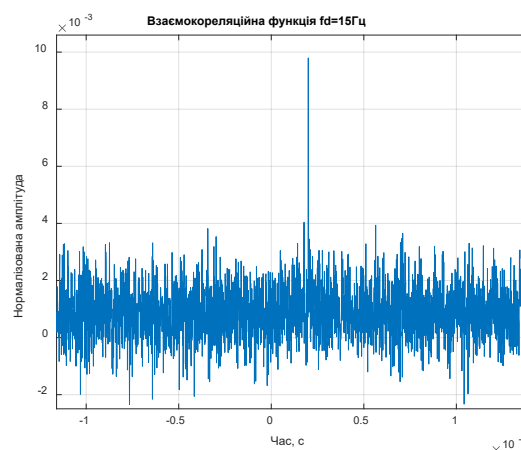


Рис. 9. Взаємкореляційна функція з зсувом Доплера $f_{d2} = 15$ Гц

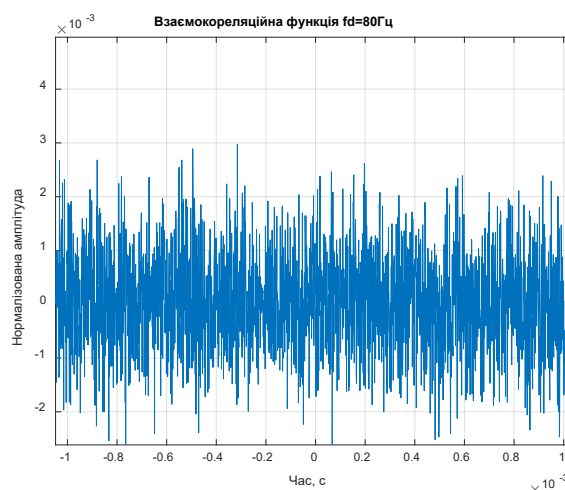


Рис. 10. Взаємкореляційна функція з зсувом Доплера $f_{d3} = 80$ Гц

Отже, для точного вимірювання дальності до об'єкта, який рухається з високою радіальною швидкістю, необхідно компенсувати доплерівський зсув частоти у відбитому сигналі.

Компенсацію доплерівського зсуву можна виконати за допомогою схеми на рис. 11.

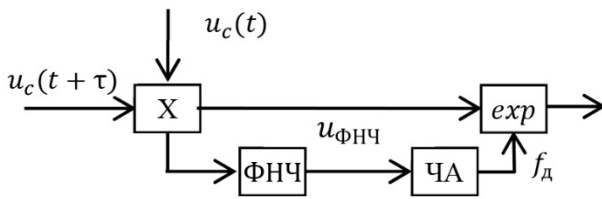


Рис. 11. Схема компенсації зсуву Доплера

На рис. 11 ФНЧ – фільтр низьких частот; ЧА – частотний аналізатор; exp – блок множення на експоненту $e^{-j2\pi f_d t}$.

Сигнал з виходу перемножувача подається на ФНЧ та на блок множення на експоненту. ФНЧ виділяє інформаційну складову з сигналу перемножувача, яка записується у наступному вигляді (рис. 12):

$$u_{\text{ФНЧ}}(t + \tau) = U_{\text{ФНЧ}} \cdot \cos(-2\pi f_d t - 2\pi(f_{c0} + f_d)\tau + \beta_0(p_t - p_{t+\tau})),$$

де $U_{\text{ФНЧ}}$ – амплітуда сигналу на виході ФНЧ.

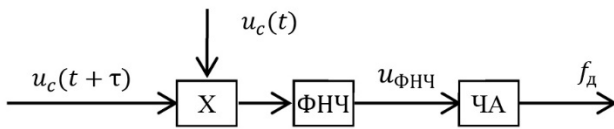


Рис. 12. Формування сигналу ФНЧ

Спектр сигналу $u_{\text{ФНЧ}}$ представлено на рис. 13.

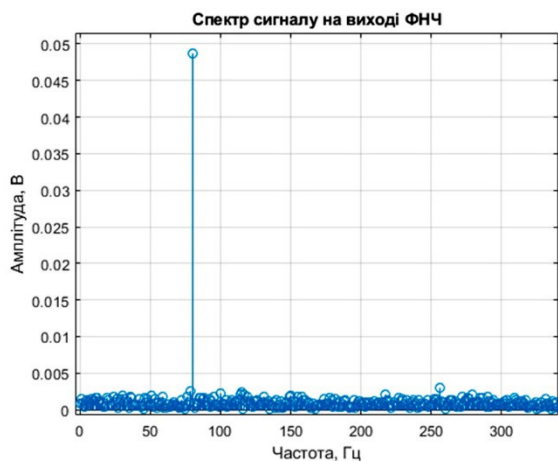


Рис. 13. Спектр сигналу на виході ФНЧ

На рис. 13 $f_{c0} = 40$ МГц; доплерівський зсув об'єкта $f_d = 80$ Гц.

Частотний аналізатор (ЧА) вимірює несучу частоту сигналу $u_{\text{ФНЧ}}(t + \tau)$, яка відповідає доплерівському зсуву f_d . Цей зсув потім подається на блок множення на експоненту, який помножує сигнал з виходу перемножувача на експоненту $e^{-j2\pi f_d t}$.

Після множення на експоненту відбитий сигнал надходить на інтегратор, на виході якого

формується взаємкореляційна функція $g(\tau)$ сигналів $u_c(t)$ та $u_c(t + \tau)$ (рис. 14).

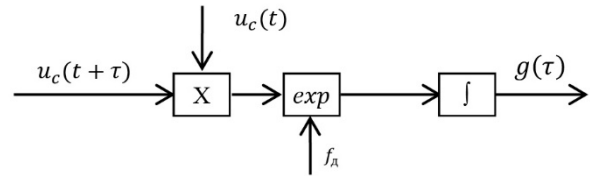


Рис. 14. Формування взаємкореляційної функції
Результат компенсації зсуву Доплера $f_d = 80$ Гц зображено на рис. 15.

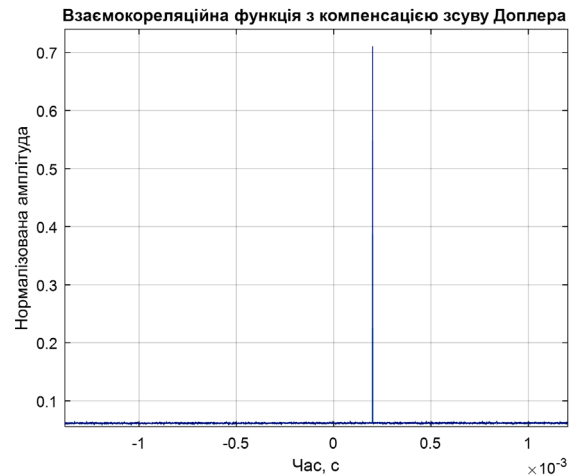


Рис. 15. Взаємкореляційна функція після компенсації

Структурна схема радіодалекоміра з компенсацією зсуву Доплера зображена на рис. 16. Блок V_r – це блок розрахунку радіальної швидкості.

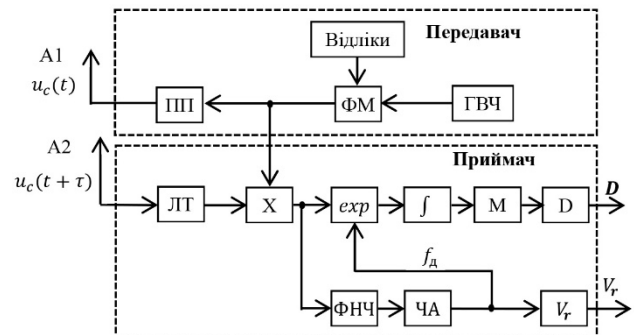


Рис. 16. Структурна схема кореляційного радіодалекоміра з компенсацією зсуву Доплера

Обробка відліків сигналів у схемі на рис. 16 виконується дискретно, тому похибка вимірювання радіодалекоміра буде залежити, насамперед, від кроку дискретизації системи. Наприклад, для кроку дискретизації $\Delta t_d = 1$ нс, похибка вимірювання дальності буде дорівнювати:

$$\Delta D = \frac{c \cdot \Delta t_d}{2} = 0,15 \text{ м.}$$

Оскільки кореляційний радіодалекомір планується використовувати, насамперед, у літальних апаратах, які виконують польоти на низьких висо-

тах, то впливом на похибку неоднорідностей атмосфери можна знехтувати.

Висновки

У статті проведено детальний аналіз кореляційного методу вимірювання дальності та запропоновано структурну схему радіодалекоміра, який реалізує принцип кореляційної обробки широко-смугового сигналу з шумоподібною модуляцією. Використання такого зондувального сигналу забезпечує чітке виділення та розпізнавання піків взаємкореляційної функції, що підтверджується результатами, представленими. Це свідчить про високу ефективність кореляційного методу у підвищенні точності системи. При цифровій обробці основним фактором, що визначає точність вимірювань, є частота дискретизації, яка має бути достатньо високою для адекватного представлення широко-смугового сигналу. В цілому, застосування кореляційної обробки широко-смугових шумоподібних сигналів відкриває перспективи для створення радіодалекомірів з покращеними характеристиками точності та надійності в різних умовах експлуатації.

Отримані результати можуть бути використані для впровадження високоточних методів в комплекси вимірювання дальності.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Survey of Radar Systems for Precision Approach and Landing Guidance in Aviation. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 41617–41639. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907535>.
- [2] Abilev M., Ivanov R. Altimetry Method for an Interferometric Radar Altimeter Based on a Phase Quality Evaluation. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 12. Art. 5508. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/12/5508>.
- [3] Torok S., Ruszinko M., Bitó J. Low Altitude Measurement Accuracy Improvement of the Airborne FMCW Radio Altimeters. *Electronics*. 2019. Vol. 8, No. 8. Art. 888. DOI: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/8/888>.
- [4] Torok S., Ruszinko M. Possibilities of Increasing the Low Altitude Measurement Precision of Airborne Radio Altimeters. *Electronics*. 2018. Vol. 7, No. 9. Art. 191. DOI: <https://www.mdpi.com/2079-9292/7/9/191>.
- [5] Nie Z., Qin M., Li H. et al. A High Accuracy FMCW Radar Altimeter with Phase Processing for Autonomous Landing. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 15. Art. 5634. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5634>.
- [6] Zakrajšek B., Borko R., Oštir K. Precision FMCW Radar Altimeter for Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. 2021. Vol. 5, No. 1. Art. 6. DOI: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/1/6>.
- [7] Al-Hourani A., Kandeepan S. On the Accuracy of Range Measurements with FMCW Radar in the Presence of Multipath and Noise. *2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. IEEE, 2016. P. 120–123. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7447785>.
- [8] Neri F., Pescapè A., Pezzimenti F. et al. Towards mmWave Altimetry for UAS: Exploring the Potential of 77 GHz Automotive Radars. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 3. Art. 94. DOI: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/3/94>.
- [9] Schartel M., Andrich T., Reuter S. Accurate Range Estimation Using Correlation-Based FMCW Radar Signal Processing. *arXiv preprint*. 2017. arXiv:1707.01485. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.01485>.
- [10] Tofighian A., Moghaddam M.E. Correlation Processing in Wideband Radar for High-Precision Navigation Applications. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 10. Art. 2823. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2823>.
- [11] Kumari P., González-Prelcic N., Heath R.W. Performance Analysis of Joint Radar and Communication using OFDM and OTFS. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1902.01184. URL: <https://arxiv.org/abs/1902.01184>.
- [12] Ільїн О.І., Прокопенко І.Г., Таран В.І. Метод вимірювання відстані за допомогою широко-смугового шумоподібного сигналу. Міжнародна конференція IEEE «Актуальні проблеми розвитку безпілотних літальних апаратів (APUAVD)», Київ, Україна, 2024. С. 68–71. DOI: 10.1109/APUAVD64488.2024.10765906.
- [13] Ільїн О.І. Аналіз методів радіолокаційного вимірювання дальності. Міжнародна конференція IEEE з інформаційних та телекомунікаційних технологій і радіоелектроніки (UkrMiCo), Київ: КПІ, 2023. С. 171–176. DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380370. ResearchGate
- [14] Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 720 p. ISBN 978-0071798327.
- [15] Mahafza B.R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 600 p. ISBN 978-1498701908.
- [16] Skolnik M.I. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 880 p. ISBN 978-0072881380.
- [17] Li J., Stoica P. MIMO Radar Signal Processing. Hoboken: Wiley, 2016. 350 p. DOI: 10.1002/9781119089575.
- [18] Nehorai A., Fuhrmann D. Radar and Sonar Signal Processing and Target Recognition. Hoboken: Wiley, 2015. 480 p. ISBN 978-1118853916.
- [19] Benedetto S., et al. Modern Radar Signal Processing. Norwood: Artech House, 2017. 520 p. ISBN 978-1630810705.

Прокопенко І. Г., Ільїн О. І.

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ РАДІОДАЛЕКОМІР З ШУМОПОДІБНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ЗОНДУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ

У статті розглядається кореляційний радіолокаційний метод вимірювання дальності. Зазначається, що розробка та дослідження нових високоточних методів вимірювання дальності є актуальною задачею, так як для сучасної авіаційної навігації та систем автоматичного управління польотом, необхідні точні дані про висоту та відстань до об'єктів. Мінімізація похибок вимірювання дальності, особливо на малих висотах, є ключовою для безпечного та точного приземлення літальних апаратів, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до аварій. Підвищення точності вимірювань не лише знижує ризик неправильної оцінки відстані, але й суттєво підвищує безпеку польотів. Вимірювання дальності у реальних умовах ускладнюється впливом перешкод та шуму. Точні вимірювання допомагають компенсувати ці негативні ефекти, забезпечуючи коректне розпізнавання об'єктів та відстаней до них навіть за несприятливих умов. Окрім того, збільшення точності розширює можливості автоматизації, знижує вплив людського фактору та дозволяє застосовувати сучасні методи обробки даних, ефективність яких є чутливою до точності початкових даних.

Розглядаються основні принципи роботи радіодалекомірів, а саме вимірювання дальності та швидкості об'єктів за допомогою радіохвиль. Розрахунок дальності зводиться до визначення часової затримки між моментом випромінювання зондувального сигналу та моментом прийняття відбитого від об'єкту сигналу. Розрахунок швидкості зводиться до визначення частотного зсуву Доплера.

В статті описуються основні методи вимірювання дальності, а саме: імпульсний, фазовий та частотний. Імпульсний метод ґрунтується на вимірюванні часу затримки відбитого імпульсу. Фазовий метод базується на визначенні дальності за різницею фаз випроміненого та відбитого сигналів. Основою частотного є використання періодичної частотної модуляції та визначенні приросту частоти сигналу. Їх принципи роботи описані математичними формулами, відзначені суттєві недоліки, притаманні розглянутим методам.

Задля підвищення точності вимірювання дальності пропонується метод вимірювання дальності, заснований на кореляційній обробці широкосмугового сигналу з шумоподібною модуляцією. Наведено структурну схему радіодалекоміру, яка реалізує цей метод. З застосуванням математичних формул та графіків функцій детально розглядається принцип роботи схеми. Окрім того, в статті зазначається, що за допомогою наведеної схеми можливий також розрахунок швидкості спостережуваного об'єкта. Наводяться відповідні формули та розрахунки.

В статті доводиться, що впровадження кореляційного методу в комплекси вимірювання дальності дозволяє суттєво підвищити їх точність.

Ключові слова: радіолокаційна система; радіотехнічна система; вимірювання; кореляція; обробка сигналів; аеронавігаційна система; радіоелектронні системи.

Prokopenko I., Ilin O.

CORRELATION RADIO RANGEFINDER WITH NOISE-LIKE MODULATION OF THE SOUNDING SIGNAL

The article considers the correlation radar method of measuring the distance. It is noted that the development and research of new high-precision methods of measuring the distance is an urgent task, since modern aviation navigation and automatic flight control systems require accurate data on the height and distance to objects. Minimizing errors in measuring the distance, especially at low altitudes, is key to safe and accurate landing of aircraft, since even minor errors can lead to accidents. Increasing the accuracy of measurements not only reduces the risk of incorrect distance estimates, but also significantly increases flight safety. Measuring the distance in real conditions is complicated by the influence of obstacles and noise. Accurate measurements help compensate for these negative effects, ensuring correct recognition of objects and distances to them even under adverse conditions. In addition, increasing accuracy expands automation capabilities, reduces the impact of the human factor, and allows the use of modern data processing methods, the effectiveness of which is sensitive to the accuracy of the initial data.

The basic principles of radio rangefinders are considered, namely measuring the range and speed of objects using radio waves. The calculation of the range is reduced to determining the time delay between the moment of emission of the sounding signal and the moment of reception of the signal reflected from the object. The calculation of the speed is reduced to determining the Doppler frequency shift.

The article describes the main methods of measuring the distance, namely: pulse, phase and frequency. The pulse method is based on measuring the delay time of the reflected pulse. The phase method is based on determining the distance by the phase difference of the emitted and reflected signals. The basis of the frequency method is the use of periodic

frequency modulation and determining the signal frequency gain. Their principles of operation are described by mathematical formulas and significant shortcomings inherent in the considered methods are noted.

In order to increase the accuracy of range measurement, a range measurement method based on correlation processing of a broadband signal with noise-like modulation is proposed. A structural diagram of a radio rangefinder that implements this method is presented. Using mathematical formulas and function graphs, the principle of operation of the scheme is considered in detail. In addition, the article notes that using the presented scheme, it is also possible to calculate the speed of the observed object. The corresponding formulas and calculations are given.

The article proves that the introduction of the correlation method into range measurement complexes allows to significantly increase their accuracy.

Keywords: radar system; radio engineering system; measurement; correlation; signal processing; aeronavigation system; radio-electronic systems.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2025 р.

Прийнято до друку 20.08.2025 р.