

УДК 347.773.2

М. Г. Моргун

СПОСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛОКАЦІЇ В ПРОСТОРИ

Розглядається спосіб використання ультразвуку для визначення координат тіл у просторі шляхом використання чотирьох приймачів ультразвуку та можливості повороту антенної системи на заданий азимут. Проведено дослідження теоретично досяжної точності визначення координат при конкретно заданих розмірах та дискретності повороту антенної системи.

Ключові слова: *ультразвук, ультразвукова локація.*

Вступ

Багато тварин успішно користуються ультразвуком. Наприклад, летючі миші для орієнтування посилають ультразвукові сигнали високої інтенсивності: на відстані кількох сантиметрів від голови кажанів тиск ультразвуку складає близько 60 МБар (це рівень шуму відбійного молотка). А самі летючі миші здатні сприймати сигнал в 10000 разів слабший. При цьому летючі миші дуже добре справляються з різними шумами, проте сам спосіб аналізу прийнятих сигналів досі залишається не відомий [1–3].

Ультразвукові сигнали, які використовуються тваринами для локації мають або імпульсний, або гармонічний характер. Гармонічні сигнали найбільш характерні для летючих мишей. Так у гладконосої летючої миші сигнал починається з частоти 75 кГц, продовжується 2–5 мс і за цей час його частота лінійно падає до 45 кГц. А у великого підковоноса тон постійної частоти 81–82 кГц триває 40–100 мс, але в кінці сигналу його частота швидко (за 1–3 мс) падає до 60–70 кГц. Мадагаскарські землерийки використовують сигнали імпульсного типу протяжністю 0.1–3.5 мс і з частотою близько 20 кГц. Зовсім загадковими є локаційні сигнали дельфінів: вони дуже короткі (0.04–0.1 мс) і мають широкий спектр (який простягається від 30 до 150 кГц) [1, 3].

У тварин, які використовують ультразвук, дуже розвинена система обробки прийнятих ехо-сигналів. Так летючі миші здатні помітити дріт діаметром 0.2 мм, натягнутий на відстані 5 мм від плоскої відбиваючої поверхні. А дельфін афаліна виявляє свинцеву кульку діаметром 3 мм на відстані 4 м. Крім того дельфіни легко відрізняють предмети, які слабо відрізняються формою або матеріалом [1].

Мета статті

На даний час, ультразвук хоча і застосовується у різних галузях промисловості та медицини [4, 5], але для локації об'єктів у просторі він майже не використовується. Як правило, за допомогою ультразвуку вимірюється лише відстань до найближчого об'єкту без урахування напрямку [6, 7].

Тому, метою даної роботи була розробка простого у використанні, економного і компактного пристрою для ультразвукової локації на невеликі відстані, який би дозволяв визначати не лише відстань до об'єктів, а й точне положення в просторі.

Такі пристрої можна в подальшому використовувати для створення різноманітних програмно-апаратних комплексів. Це може бути, наприклад, ультразвуковий комплекс для автоматичного паркування автомобілів, охоронна система (для контролю проникнення сторонніх осіб в охоронну зону з можливістю, наприклад, не реагувати на нерухомі об'єкти чи дрібні рухомі – птахи чи інші тварини), або комплекс для фізичних

вимірів та досліджень особливостей розповсюдження ультразвуку в різних умовах, або для використання у промисловості для автоматизації чи дистанційного контролю процесів, коли використання інших методів є неможливим чи недоцільним (наприклад, хімічно активне або агресивне середовище, висока або дуже низька температура в контрольованому просторі).

Виклад основного матеріалу

Принципи ультразвукової локації та ідеї, що закладено в приладі.

Для того, щоб максимально використати можливості ультразвуку для локації та створити пристрій, який би міг випромінювати та приймати ультразвукові коливання, спочатку потрібно визначитись з принципами локації взагалі, а потім, на їх основі, розробити конструкцію ультразвукового локатора.

Ультразвукова локація – це метод виявлення і дослідження об'єктів шляхом аналізу випромінюваних ним або відбитим від нього ультразвукових хвиль [1]. У першому випадку локація називається пасивною (оскільки потрібно аналізувати лише ультразвукові сигнали, що випромінює об'єкт), а в другому – активною (у цьому випадку пристрій для локації повинен сам випромінювати ультразвук та аналізувати відбиті від об'єктів ехо-сигнали). У роботі розглядається лише активна локація, оскільки більшість об'єктів не випромінюють ультразвук.

Мета локації може бути різною: в одних випадках достатнім є тільки виявлення об'єкту, в інших – окрім виявлення об'єкту потрібно знати його місцезнаходження. Основним завданням створення даного пристрою є отримання максимуму можливої інформації про об'єкт (розмір, форму об'єкту та, за можливості, властивості матеріалу об'єкту – наприклад, щільність чи в'язкість).

Класичний метод локації, який використовують радіолокаційні станції (РЛС) для пошуку та супроводження літаків та інших літаючих об'єктів, зображено на рис. 1а.

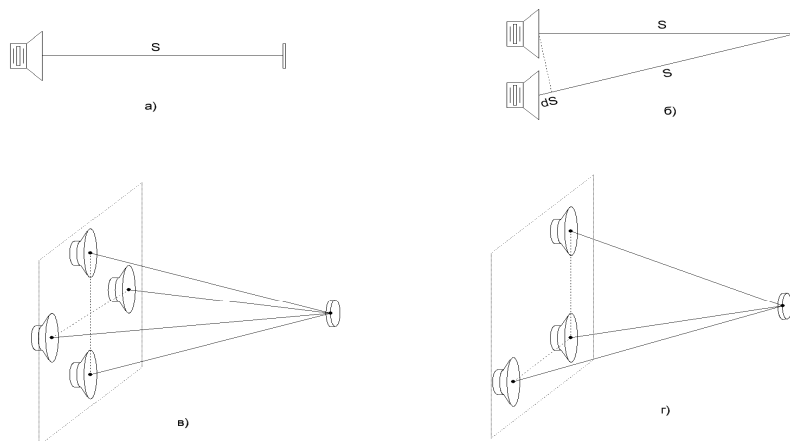


Рис. 1. Принцип локації

Зондуючий імпульсний сигнал випромінюється антеною. На відстані S частина енергії цього сигналу, зустрівши перешкоду у вигляді об'єкту (який в локації прийнято називати мішенню), відбивається в зворотному напрямку і, пройшовши знову шлях S , потрапляє в антену локатора. Таким чином, визначивши різницю в часі Δt між зондуючим і прийнятим імпульсом можна обчислити відстань до мішені:

$$S = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \Delta t,$$

де v – швидкість розповсюдження сигналу локатора.

Напрямок на мішень (тобто азимут) визначають за положенням антени. Для цього потрібно, щоб антена мала якомога вужчу діаграму направленості (*діаграма направленості* – це графік, як правило в полярній системі координат, залежності потужності випромінювання (або прийому) від напрямку (кута)), що призводить до необхідності споруджувати антени дуже великих розмірів, які потрібно й достатньо швидко повертати. До того ж РЛС визначають тільки азимут і дальність до мішені. Щоб визначити положення мішені в просторі необхідною є ще одна координата, наприклад висота мішені відносно поверхні землі (на практиці для цього разом з РЛС використовують інші станції – висотоміри, які визначають кут між напрямком на мішень та горизонтом, а знаючи його та відстань до мішені, вираховують висоту польоту об'єкту) [8, 9]. Оскільки створення вузьконаправленої антени вимагає великих матеріальних затрат, така антена складна у виготовленні та має великі розміри, то для розв'язання поставленої задачі такий спосіб локації для приладу не підходить. З ідей, закладених в основу роботи РЛС, можна використати лише спосіб визначення відстані до мішені.

Якщо використати дві прийомні антени, які рознесені у просторі на деяку відстань (рис. 1б), то вимоги до антен значно знижуються – вони можуть мати досить широку діаграму направленості. Різницю ходу dS , а отже і напрямок на мішень (у площині розміщення антен та мішені), можна обчислити геометрично по різниці в часі приходу ехо-сигналу до кожної з антен.

Проте, щоб визначити координати мішені в просторі, потрібно мати ще дві антени, які були б розміщені (разом з мішенню) в ортогональній до попередньої площині (рис. 1в). Таким чином, маючи відстань до мішені та два кути в ортогональних площинах, можна однозначно визначити положення мішені в просторі.

Кількість приймачів сигналу можна зменшити до трьох, розмістивши їх у вершинах прямокутного трикутника (рис. 1г), фактично сумістивши два приймачі з різних площин. При цьому можливості антенної системи не зміняться.

Для підвищення точності визначення координат потрібно збільшувати відстані між приймальними антенами, проте прилад має бути компактним. Тому вирішенням даної проблеми може бути додавання ще одного приймача, який необхідно розмістити так, щоб приймачі знаходилися у вершинах прямокутника. В такому випадку можна виділити 4 групи із трьох приймачів, які б лежали у вершинах прямокутного трикутника. Це дозволить зробити 4 незалежних вимірювання і підвищити точність за рахунок усереднення результатів. Приймачі також можна згрупувати попарно і отримати 6 вимірів. Додавання четвертого приймача економічно обґрунтовано, оскільки вартість приладу збільшиться лише на ціну одного ультразвукового датчика (що складає на момент написання статті близько 1\$).

Передавальну антену можна розміщувати неподалік від прийомних, головне, щоб вона була направлена в тому ж напрямку, що й прийомні, і їхні діаграми направленості перекривались. Враховуючи, що всі антени конструктивно повинні бути жорстко закріплені на платформі, яка має змогу повертатись, а приймальні антени повинні, за можливості, бути як найбільш віддалені одна від одної (для підвищення точності визначення кутів), найкращим місцем для передавальної антени, з міркувань простоти обчислень, був би геометричний центр прийомних антен.

Проаналізувавши можливі способи розміщення антен на поворотній платформі, пропонується варіант, представлений на рис. 2а. Для покращення точності визначення кутів, доцільно розмістити прийомні антени (4 шт.) на краях прямокутної платформи, а

на перетині діагоналей – передавальну. Щоб розрізнити прийомні антени позначимо: ПВ – права верхня, ПН – права нижня, ЛВ – ліва верхня та ЛН – ліва нижня. У порівнянні з варіантом із трьома прийомними антенами (де можна виконати два заміри кутів: один – по горизонталі, другий – по вертикалі), у варіанті, що пропонується, можна виконати шість замірів (2 – по горизонталі, 2 – по вертикалі і 2 – по діагоналях). Сумістивши ці заміри (рис. 2б) і взявши їх переріз, отримаємо більш точне і надійне визначення координат (як кутів, так і відстані до мішені). На рис. 2б заштрихованими смугами показано результати вимірів кутів для кожної пари прийомних антен, враховуючи скінчену роздільну здатність реального приладу.

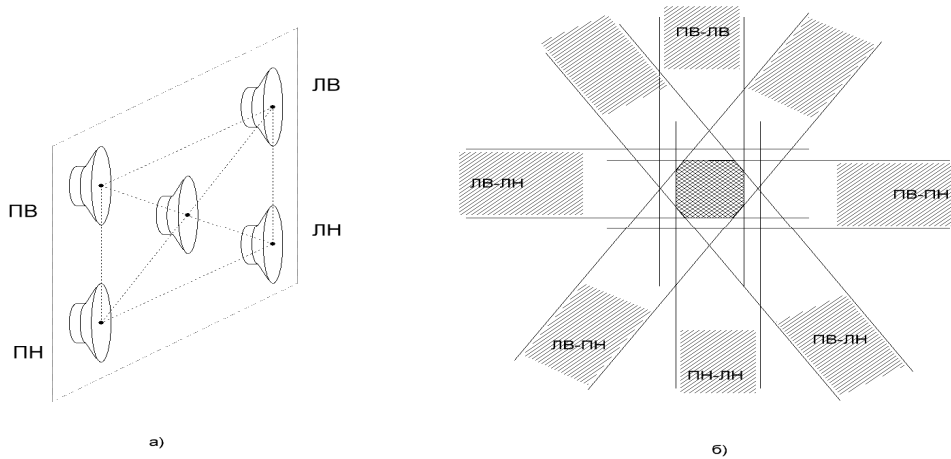


Рис. 2. Антенна система приладу

Вимоги до апаратної частини

Для випромінювання та прийому ультразвуку доцільно використати широко розповсюджені ультразвукові п'єзоперетворювачі [10].

П'єзоперетворювачі характеризуються своєю власною резонансною частотою (в реально виготовленому приладі вона дорівнює 32,53 кГц). Також важливою характеристикою п'єзоперетворювача є його діаграма направленості. На рис. 3 зображено діаграму направленості п'єзоперетворювачів, які використано в приладі.

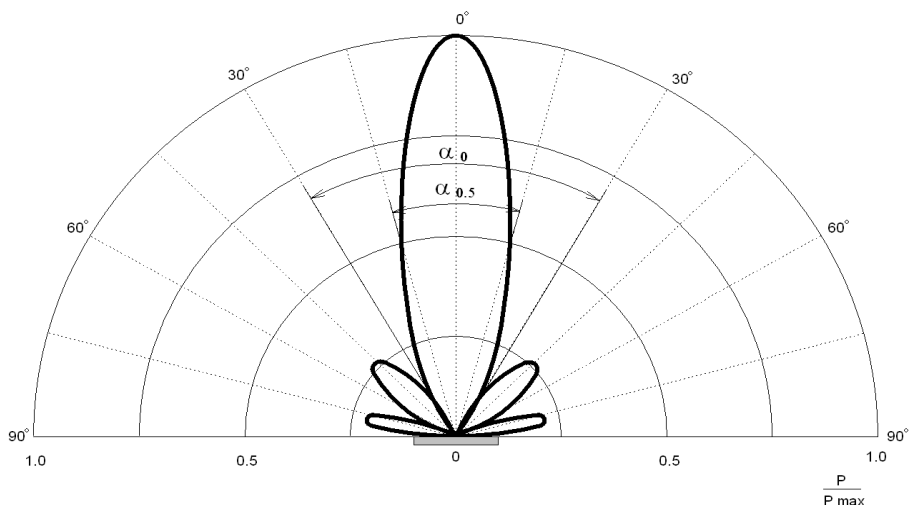


Рис. 3. Діаграма направленості ультразвукових перетворювачів, що застосовані в приладі

З діаграми видно, що максимум випромінювання співпадає з нормаллю до площини п'єзоперетворювача (головна пелюстка діаграми направленості). Бокові пелюстки мають значно меншу інтенсивність. Головна пелюстка характеризується двома кутами, які є головними характеристиками п'єзоперетворювачів, поряд із резонансною частотою:

$\alpha_{0,5}$ – це ширина головного максимуму на рівні половини потужності, та

α_0 – це ширина головного максимуму по першим нулям.

Знаючи, що п'єзоперетворювачі, які використані в приладі, мають діаметр $d = 15$ мм і довжину хвилі $\lambda = 10,45$ мм, можемо знайти ці кути [1]:

$$\alpha_{0,5} = 2 \arcsin \frac{1.12 \lambda}{\pi d} \approx 30^\circ; \quad \alpha_0 = 2 \arcsin \frac{2.22 \lambda}{\pi d} \approx 62^\circ.$$

Звідси випливає, що, не повертаючи антенну, можна ефективно досліджувати простір в секторі шириною близько 30° . Тому дискретності установки азимуту антени в декілька градусів буде достатньо.

Для спрощення та здешевлення апаратної частини в приладі використано недорогий мікроконтролер AT89C2051-24PI (близько 1.5\$), на який покладено функції по керуванню вузлами локатора та по забезпеченню зв'язку з комп'ютером в реальному часі. У своєму складі він містить апаратно реалізований модуль UART для роботи з СОМ-портом. Для забезпечення максимальної (для мікроконтролера) швидкості обміну (115200 бод) обрано тактову частоту 22.1184 МГц. Для більш ефективної роботи в реальному часі керуюча програма написана на мові асемблера.

Блок-схема приладу. Блок-схему приладу зображено на рис. 4. Мікроконтролер здійснює керування всією апаратною частиною приладу. До підсистеми повороту антенної системи входить: драйвер крокового двигуна, кроковий двигун, редуктор, датчик положення антени та RS-тригер. Використання крокового двигуна спричинено тим, що він дозволяє повернути механізм на строго визначений кут. Редуктор сповільнює обертання двигуна в 15 разів, що дозволяє встановлювати азимут з точністю до $0,75^\circ$. Оскільки люфт у редукторі, який використано у приладі, має приблизно таку ж величину, то вибрано дискретність установки антени $1,5^\circ$. Сигнали керування фазами формує мікроконтролер. Вони збільшуються по напрузі драйвером і подаються на двигун. Сигнал від датчика положення антени переводиться у цифровий вигляд за допомогою RS-тригера і повідомляє мікроконтролеру, коли антенна система має нульовий азимут (використовується для самокалібровки при увімкненні радару).

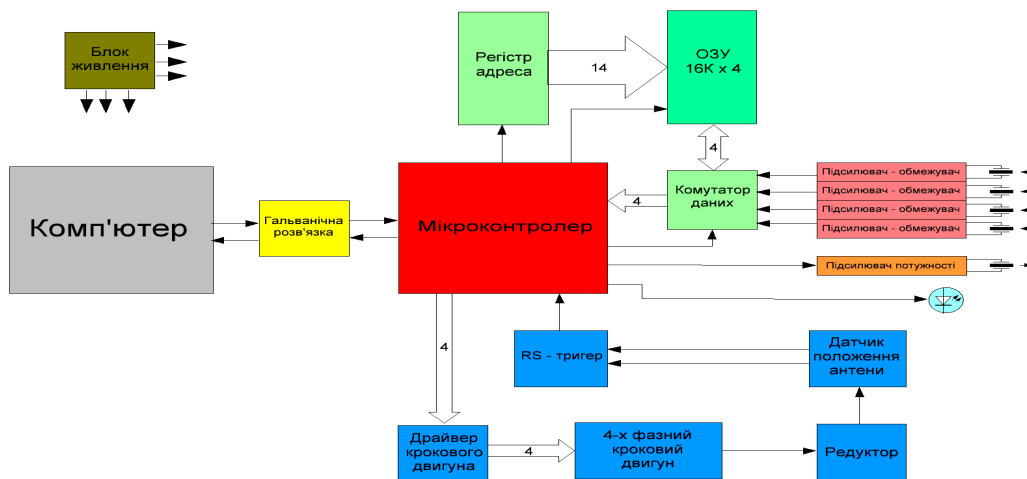


Рис. 4. Блок-схема приладу ультразвукової локації

При скануванні простору ультразвуком мікроконтролер формує імпульси частотою 32,53 кГц, які підсилюються і випромінюються передавальним п'єзоперетворювачем. Відбиті від мішені ехо-сигнали сприймають інші чотири прийомні п'єзоперетворювачі, які в подальшому підсилюються і обмежуються по амплітуді та через комутатор поступають для тимчасового зберігання в мікросхему пам'яті. Далі мікроконтролер переключає комутатор «на себе», зчитує дані, упаковує їх в байти та передає їх комп'ютеру. Для адресації пам'яті використано зовнішній регістр адресу, що дозволяє звести кількість задіяних для адресації портів мікроконтролера до одного.

Оскільки комп'ютер є джерелом достатньо потужних електромагнітних завад і на його корпусі, в разі відсутності заземлення, може бути потенціал близько 120 Вольт, то, щоб уберегти локатор від завад та пошкодження, задіяно гальванічну розв'язку. Вона представляє собою дві лінії (прийом і передача), що розділені фізично (гальванічно) оптичними каналами (світлодіод → прозорий діелектрик → фототранзистор).

Точність визначення координат ультразвуковим локатором та методи поліпшення роздільної здатності.

Оцінимо теоретично досягну точність вимірювання за допомогою ультразвукового локатора.

Для робочої частоти 32,53кГц довжина хвилі складає близько $\lambda = 10,45$ мм. При прийомі в приладі здійснюється рівно 5 вибірок за період. Так як відстань до мішені знаходиться як половина шляху, який пройшла хвиля, то точність виміру відстаней (однією антеною) становить:

$$\frac{1}{2} \cdot (\lambda / 5) = 1.045 \text{ мм.}$$

Якщо скористатися наявністю 4-х антен і врахувати, що прийомні антени розміщені симетрично (рівновіддалені від геометричного центру антенної системи, від якого вимірюється відстань (рис. 5а)), то відстань до мішені визначатиметься так: $S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) / 4$.

Усереднення результатів вимірів дозволяє підвищити достовірність визначення відстані, хоча, для практичних цілей, точність до 1 мм у більшості випадків буде достатньою.

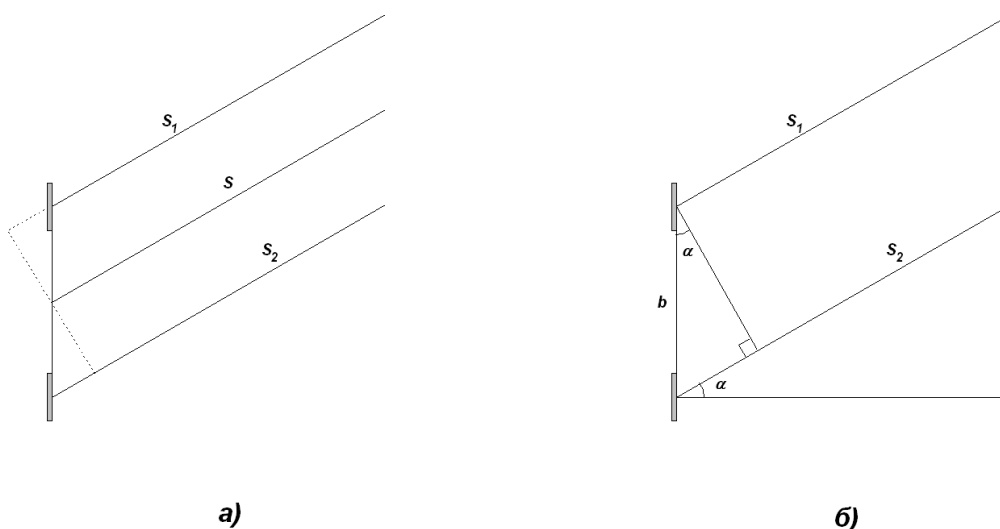


Рис. 5. Принцип визначення відстані (а) та кутів (б)

Оцінимо точність вимірювання кутів (рис. 5б). Кут можна визначити із прямокутного трикутника, знаючи базову відстань між антенами b та різницю ходу $S_2 - S_1$. Точність вимірювання різниці ходу складає $dS = \lambda/5 \approx 2.1$ мм. Тоді множину всіх можливих дискретних значень кутів, які визначатиме локатор, можна знайти за формулою:

$$\alpha = \arcsin \frac{S_2 - S_1}{b} \approx \arcsin \frac{n \cdot dS}{b},$$

де n – кількість відстаней dS , які вміщуються на відрізку завдовжки в різницю ходу.

Визначимо абсолютну похибку вимірювання кутів локатором в межах основної пелюстки діаграми направленості антен (30°), враховуючи конкретні розміри антенної системи: відстань між приймачами по горизонталі складає 80 мм, по вертикалі – 40 мм. Залежність похибки вимірювання кута по горизонталі показано на рис. 6, по вертикалі – на рис. 7.

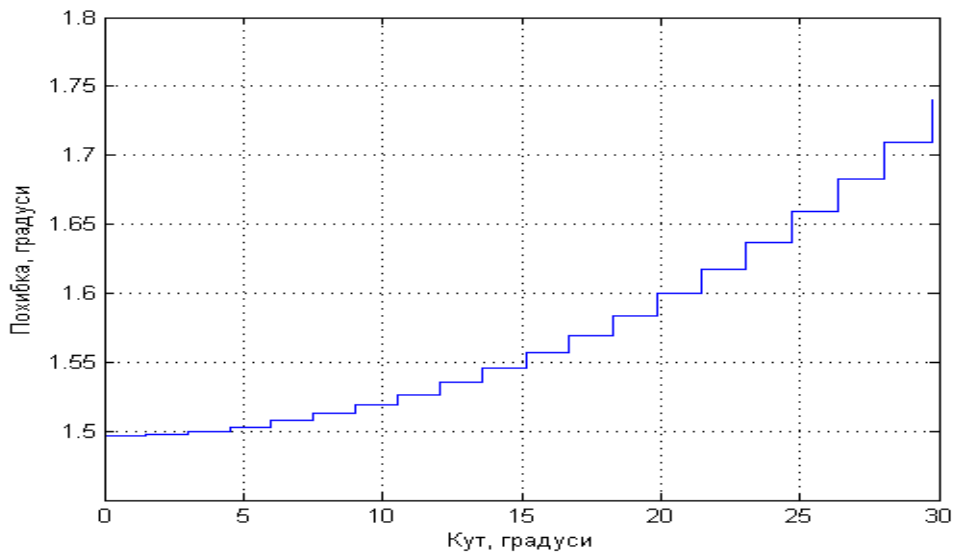


Рис. 6. Залежність похибки визначення кута по горизонталі від напрямку

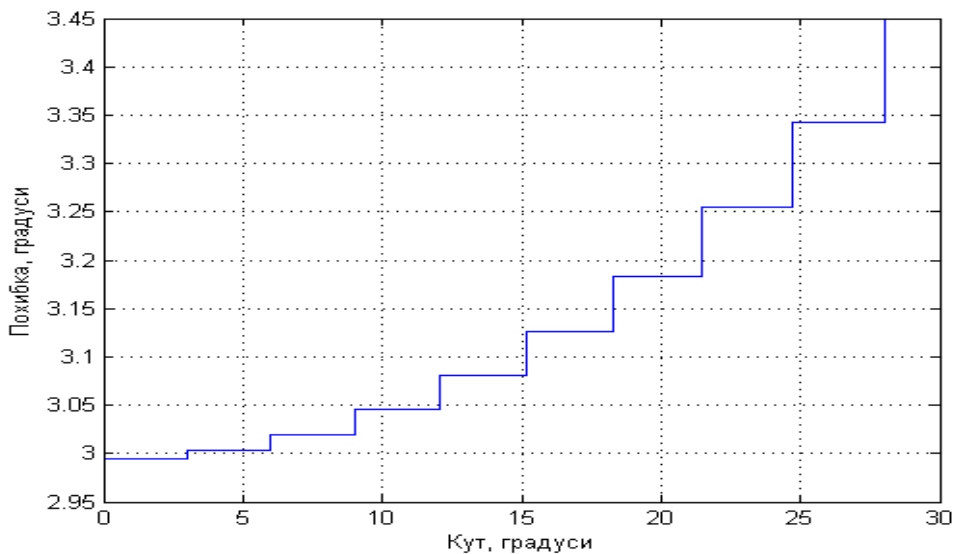


Рис. 7. Залежність похибки визначення кута по вертикалі від напрямку

За результатами моделювання можна зробити наступні висновки: 1) величина похибки є мінімальною при 0° ; 2) похибка значно зростає при великих кутах відхилення. Окрім того, за графіками можна побачити, що похибка по вертикалі вдвічі більша за похибку по горизонталі. Це пояснюється тим, що база по горизонталі (80 мм) вдвічі більша за базу по вертикалі (40 мм).

На основі попередніх графіків можна отримати залежність загальної похибки у визначенні напрямку на мішень від кутів по горизонталі та вертикалі. Результат наведено на рис. 8. Тут загальна похибка визначається як векторна сума похибок для кутів по горизонталі та вертикалі.

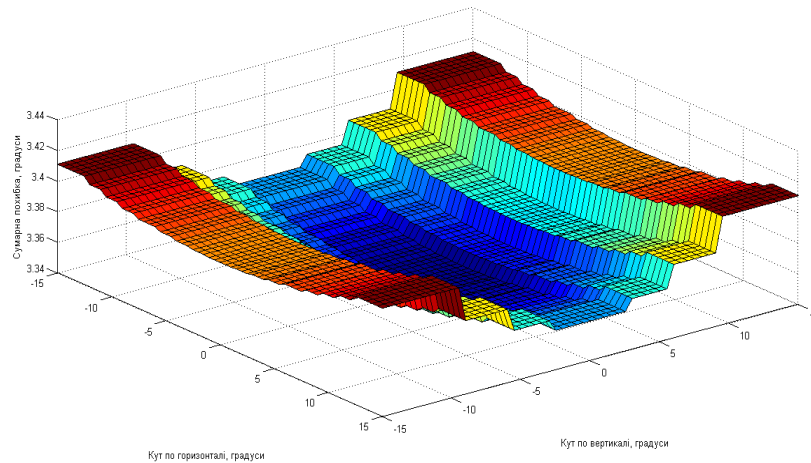


Рис. 8. Залежність похибки вимірювання кута від напрямку

Максимальна похибка по горизонталі при нульовому азимуті становить близько 1.5° . Це достатньо значна похибка для об'єктів, що знаходяться на відстані. Тому постає питання про підвищення точності вимірювання.

Для вирішення цієї проблеми можна зробити кілька замірів кутів при різних положеннях антенної системи. Наприклад, для двох вимірів при положеннях антенної системи 0° та 15° отримаємо наступну залежність похибки від горизонтального кута (рис. 9).

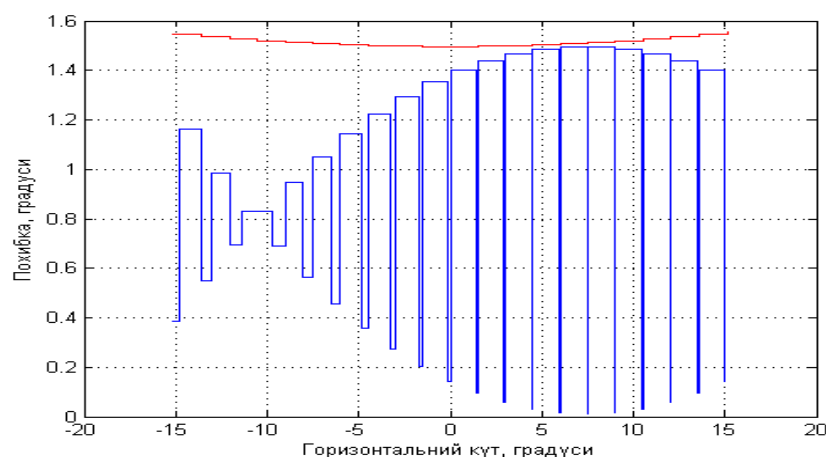


Рис. 9. Підвищення точності виміру кутів при двох замірах.

Верхній й графік для 1-го заміру при азимуті 0° , нижній – при 2-х замірах: 0° та 15°

За графіком для кутів близьких до -10° похибка зменшується майже вдвічі, що дозволяє виділити можливу послідовність дій при роботі з локатором:

1. Скануємо простір (в межах головної пелюстки діаграми направленості) при куті 0° і знаходимо приблизний азимут на мішень.
2. Для підвищення точності “розглядаємо” мішень під деяким іншим кутом, повернувши антенну систему. Як видно з рис. 9 оптимальним буде поворот антени так, щоб напрямок на мішень та напрямок антенної системи відрізнялись на кут близько 25° (в нашому випадку дискретність установки азимуту становить 1.5° , тому найближче значення складає 25.5°).

Таким чином, достатньо лише одного додаткового заміру. Якщо мішеней буде багато, то вигідніше зробити декілька замірів в межах діаграми направленості, наприклад, на рис. 10 зображено результат ручного підбору кутів положень антенної системи для чотирьох замірів: -19.5° ; -12° ; $+12^\circ$; $+19.5^\circ$.

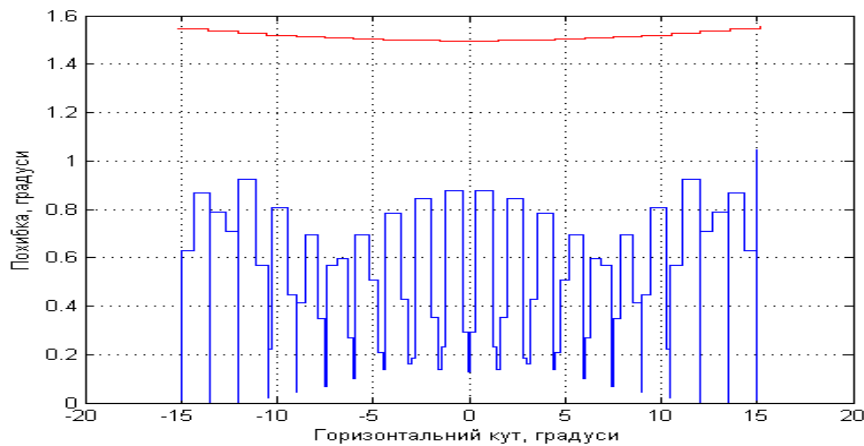


Рис. 10. Підвищення точності виміру кутів при чотирьох замірах.
Верхній графік для 1-го заміру при азимуті 0° ,
нижній – при 4-х замірах: -19.5° ; -12° ; $+12^\circ$; $+19.5^\circ$

Як видно з графіка, в межах діаграми направленості похибка не перевищує 0.95° , в порівнянні із 1.55° при одному замірі в положенні 0° .

Якщо заміри провести у всіх можливих положеннях антенної системи в межах головної пелюстки діаграми направленості (від -15° до $+15^\circ$ із кроком 1.5°), то отримаємо графік, зображений на рис. 11.

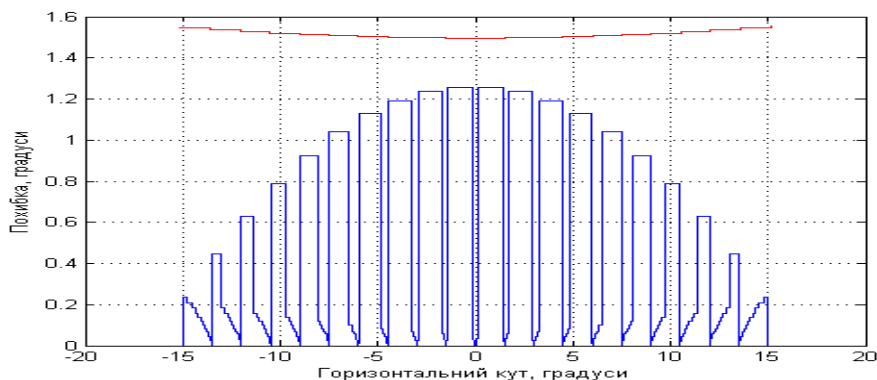


Рис. 11. Підвищення точності виміру кутів при всіх можливих положеннях антенної системи у межах головної пелюстки діаграми направленості
Верхній графік для 1-го заміру при азимуті 0° ,
нижній – при всіх можливих замірах в діапазоні азимутів від -15° до $+15^\circ$

За графіком похибка лежить у межах від 0.2° до 1.25° . При збільшенні меж можливих кутів антенної системи похибка поступово зменшується і для діапазону від -24° до $+24^\circ$ графік має такий вигляд (рис. 12). Тобто можна досягти точності близько 0.2° , при умові, що всі сигнали поза межами головної пелюстки діаграми направленості будуть прийняті.

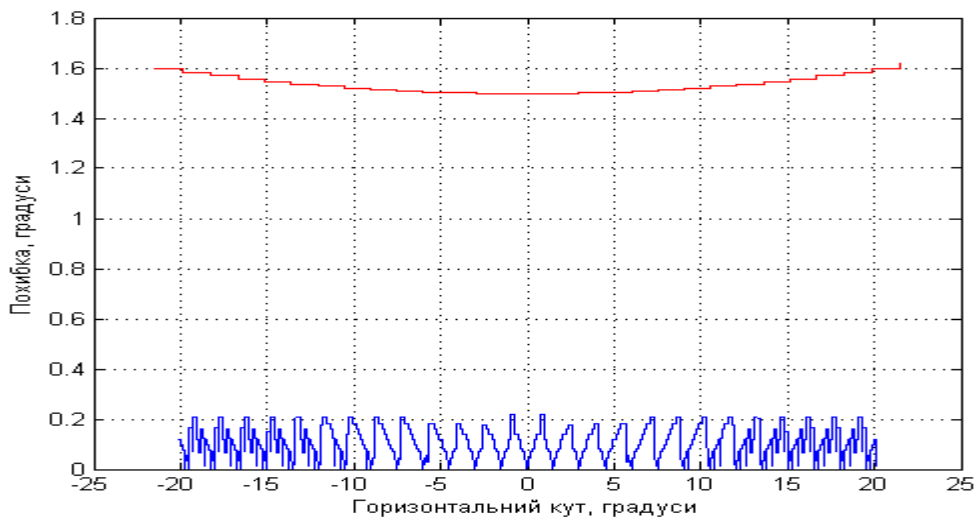


Рис. 12. Підвищення точності виміру кутів при всіх можливих положеннях антенної системи у межах від -24° до $+24^\circ$

Верхній графік для 1-го заміру при азимуті 0° ,
нижній – при всіх можливих замірах в діапазоні азимутів від -24° до $+24^\circ$

Висновки

У роботі запропоновано спосіб й теоретичне обґрунтування можливості та точності визначення координат об'єктів за допомогою ультразвукової локації в просторі шляхом спеціального розміщення передавальної і приймальної антен, які жорстко закріплені на платформі. При комп'ютерному моделюванні роботи приладу було встановлено, що для підвищення точності вимірювання координат потрібно мати можливість повороту антенної системи.

Завдяки використанню мікроконтролера та можливості заміни аналогових сигналів з приймальної антен на цифрові (що дозволило відмовитися від аналого-цифрових перетворювачів в каналах прийому та суттєво зменшити об'єм даних, які передаються для обробки комп'ютером), вдалося значно спростити та здешевити апаратну реалізацію локатора. На основі цих ідей було розроблено схему та виготовлено сам локатор.

Подяки

Робота виконана під керівництвом та у співробітництві з доцентом Богатирьовим О.О.

Стаття надійшла 24 . 07 . 2015
Прийнято до друку 31 . 07 . 2015

Література

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.
2. Эхолокационная система бабочек / Д.Н. Лапшин; отв. ред. Н.А. Тамарина; М.: Наука. 2005. 206 с.
3. Айрапетянц Э.Ш., Константинов А.И., Эхолокация в природе 2 изд., Л., 1974.
4. Krautkramer J and Krautkramer H, Ultrasonic Testing of Materials, Narasosa Publishing House, New Delhi, 1993.
5. Non-destructive Inspection and Quality Control – Metal Hand Book, American Society of Metals, 8th Ed., Vol. 11 (1976).
6. Ультразвуковой датчик расстояния. [Электронный ресурс] http://arduino-ua.com/prod182-Ultrazvukovoi_datchik_rasstoyaniya.
7. Ультразвуковой дальномер MaxSonar [Электронный ресурс] <http://arduino-ua.com> : [сайт] – Режим доступа: <http://arduino-ua.com/prod735-HRLV-MaxSonar-ultrazvukovoi-dalnomer>.
8. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304с.
9. Воздушная навигация: справочник, А.М.Белкин, Н.Ф. Миронов, Рублюв Ю.Н. и др. М. – Транспорт 1988 – 303 с.
10. Шарпов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. Москва: Техносфера 2006. – 632 с.
11. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д. Учебное пособие для вузов. М. изд-во. «Советское радио», 1970 г., 560 с.

Аннотация

Н. Г. Моргун

Способ ультразвуковой локации в пространстве.

Рассматривается способ использования ультразвука для определения координат тел в пространстве путем использования четырех приемников ультразвука и возможности поворота антенной системы на заданный азимут. Проведено исследование теоретически достижимой точности определения координат при конкретно заданных размерах и дискретности поворота антенной системы.

Ключевые слова: *ультразвук, ультразвуковая локация.*

Summary

N.G. Morhun

A method of ultrasonic location in the space.

Considered a method of using ultrasound for determining the coordinates of objects in space by use of four ultrasonic receivers and the antenna system, which can be rotated at a given azimuth. The study is theoretically achievable accuracy of the coordinates at a particular given the size and the step of rotation of the antenna system.

Keywords: *ultrasound, ultrasonic location.*