

УДК 621.317.7

## АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ КУТА НАПРЯМУ НА ЦІЛЬ РОЗПОДІЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ЗВУКОВОЇ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ РОЗВІДКИ

*О Трембач Богдан, Кочан Роман, 2016*

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Проаналізовано похибку визначення кута на ціль у системі артилерійської звукової розвідки. Досліджено обчислювальну складність формули для визначення відстані між звукоприймачами. Проаналізовано основні джерела похибки під час визначення кута напрямку на ціль. Показано залежності складових похибки визначення кута на ціль.*

*Ключові слова: акустичні джерела, мобільні пристрої, звукоприймач, похибка.*

*Проанализирована погрешность определения угла на цель в системе артиллерийской звуковой разведки. Исследована вычислительная сложность формулы для определения расстояния между звукоприемниками. Проанализированы основные источники погрешности при определении угла направления на цель. Показано зависимости составляющих погрешности определения угла на цель.*

*Ключевые слова: акустические источники, мобильные устройства, звукоприемник, погрешность.*

*The analysis determining the angle error on the target system artillery sound intelligence. Studied computational complexity of the formula for determining the distance between the sound receivers. The basic source of error in determining the direction angle to the target. Showing error components depending determine the angle to the target.*

*Sound is a type of artillery reconnaissance and combat support artillery units [1], which uses acoustic stereo to determine the direction to the target. Means sound intelligence forces Ukraine is sound-metric-type filling station AKZ-7. However, their condition technical readiness can not effectively carry out the sound of artillery reconnaissance. In [4] proposed a distributed sound system of automatic artillery reconnaissance using a plurality of independent sound receivers located on the ground and combined with wireless network using cellular channels. Sound acoustic receivers provide environmental monitoring and the detection of sound of a shot or pass to break the sound server system time and their geographic coordinates. The server system provides data aggregation sound receivers and presenting the results of the system to authorized users.*

*The aim of this work is to investigate the accuracy of measurement of the angle to the target in the implementation of systems based on advanced cellular terminals (smartphones).*

*In [5] analyzed the errors of determining the angle to the target system artillery sound intelligence. Analiz showed that the computational complexity of the formula used to estimate the error of the system is unnecessarily high. Analysis of distance between two geographical points that are scattered over a distance of 3 km (expected maximum allowable distance between the sound receivers, they hear one goal) showed that it corresponds exactly service Google Maps. Function arguments are: the distance between the sound receivers during the fixation of sounds goals sound receivers and the speed of sound in air. Error of these variables will determine the angle error of the target.*

*The dependence on the angle determining the distance between the target sound audio receivers distributed system intelligence based artillery systems provider. It tested a new method of determining the distance by geographical coordinates and compared the results with the service Google Maps. Established that the accuracy of the distance, the new method is not inferior to existing ones. This allows you to determine the distance to within 1 meter. The greatest influence on the resulting error gives a measure of time. Therefore, a further step to improve the determination of the angle of the target is to reduce the error determination time.*

*Key words: acoustic source, mobile devices, sound receiver error.*

**Вступ.** Звукова артилерійська розвідка є видом бойового забезпечення артилерійських підрозділів [1], що використовує акустичний стереоефект для визначення напрямку на ціль. Засобами звукової розвідки Збройних сил України є звукометричні станції типу АЗК-5 та АКЗ-7 [2]. Однак їхній стан

технічної готовності не дає змоги ефективно вести звукову артилерійську розвідку [3].

У [4] запропоновано розподілену автоматичну систему звукової артилерійської розвідки, що використовує множини автономних звукоприймачів, розташованих на місцевості та об'єднаних у безпроводну мережу за допомогою каналів стільникового зв'язку. Звукоприймачі забезпечують акустичний моніторинг навколишнього середовища і в разі виявлення звуку пострілу або звуку розриву передають на сервер системи час та власні географічні координати. Сервер системи забезпечує агрегацію даних звукоприймачів та надання результатів роботи системи авторизованим користувачам.

**Мета роботи** – дослідити точність вимірювання кута на ціль у разі реалізації системи на базі сучасних терміналів стільникового зв'язку (смартфонів).

У [5] проаналізовано похибки визначення кута на ціль у системі артилерійської звукової розвідки. Довжину акустичної бази (відстані між двома звукоприймачами) визначено за формулою:

$$L = 111120 \times \arccos(\sin(j_1) \cdot \sin(j_2) + \cos(j_1) \cdot \cos(j_2) \cdot \cos(I_2 - I_1)), \quad (1)$$

де  $L$  – довжина акустичної бази;  $j_1, I_1, j_2, I_2$  – географічні координати (широта та довгота відповідно) двох звукоприймачів, що утворюють акустичну базу.

Аналіз показав, що обчислювальна складність цієї формули, для оцінювання похибки системи не виправдано висока. Для порівняно невеликих відстаней між двома точками з відомими географічними координатами її можна замінити на таку [6]:

$$L = 1000 \cdot \sqrt{(K1 \cdot \Delta j)^2 + (K2 \cdot \Delta I)^2}, \quad (2)$$

де  $K1$  та  $K2$  – коефіцієнти пропорційності, що відповідають кількості кілометрів у разі зміни географічних широти та довготи на один градус;  $\Delta j = (j_2 - j_1)$  – різниця між географічною широтою двох точок, відстань між якими розраховується;  $\Delta I = (I_2 - I_1)$  – різниця між географічною довготою двох точок, відстань між якими розраховується.

Коефіцієнти пропорційності розраховують як:

$$\begin{cases} K1 = 111.13209 \cdot 0.56605 \cdot \cos(2j_{\text{сеп}}) + 0.00120 \cdot \cos(4j_{\text{сеп}}) \\ K2 = 111.41513 \cdot \cos(j_{\text{сеп}}) - 0.09455 \cdot \cos(3j_{\text{сеп}}) + 0.00012 \cdot \cos(5j_{\text{сеп}}) \end{cases}$$

де  $j_{\text{сеп}} = \frac{j_2 + j_1}{2}$  – середнє значення географічної широти.

Аналіз показав, що різниця між методами визначення відстані на основі залежностей (1) та (2) у разі визначення відстані між двома точками із заданими географічними координатами в межах України, відстань між якими до 3 км (очікувана максимально допустима відстань між звукоприймачами, що фіксують одну ціль), не перевищує 1 м і відповідає точності сервісу Google Maps, що є нехтовно малою величиною порівняно з похибкою задіяних у системі GPS-приймачів.

Отже, формула непрямого вимірювання кута на ціль ( $a$ ) матиме вигляд [1]:

$$a = \arcsin\left(\frac{\Delta t \cdot c}{L}\right), \quad (3)$$

де  $\Delta t = (t_1 - t_2)$  – різниця часу фіксації звукових хвиль цілей звукоприймачами,  $c$  – швидкість поширення звукових хвиль у повітрі.

Аргументами функції є: відстань між звукоприймачами, часи фіксації звуків цілей звукоприймачами, а також швидкість звуку в повітрі. Похибки обчислення цих величин визначатимуть похибку визначення кута на ціль.

Складовою похибки непрямого вимірювання кута на ціль зумовлена похибкою вимірювання довжини акустичної бази  $\Delta a_L$ , визначається як [7]:

$$\begin{aligned} \Delta a_L &= \frac{\partial a}{\partial L} \cdot \Delta L = \arcsin\left(\frac{\Delta t \cdot c}{L}\right) \cdot \left(\frac{\Delta t \cdot c}{L}\right)' \cdot \Delta L = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta t \cdot c}{L}\right)^2}} \cdot \left(-\frac{\Delta t \cdot c}{L^2}\right) \cdot \Delta L = \\ &= -\frac{\Delta t \cdot c \cdot \Delta L}{L \sqrt{(L - \Delta t \cdot c) \cdot (L + \Delta t \cdot c)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\Delta L$  – похибка вимірювання довжини акустичної бази  $L$ ;  $\frac{\partial a}{\partial L}$  – часткова похідна залежності (3) за змінною  $L$ .

У разі використання як звукоприймачів мобільних пристроїв похибка позиціонування побутових моделей не перевищує  $\pm 5$  м. Тоді границя абсолютної похибки визначення довжини акустичної бази  $\Delta L = \pm 10$  м. Відносно змінної  $\Delta t$  залежність (4) є непарною функцією, тому її можна аналізувати для однієї полярності з подальшою екстраполяцією отриманих результатів. Знак «-» перед результуючою залежністю (4), оцінюючи границі похибки, можна не враховувати,

оскільки значення  $\Delta L$  симетричне відносно нуля. Графік залежності складової похибки  $\Delta a_L$  від довжини акустичної бази  $L \in [30, 3000]$  та різниці часу  $\Delta t \in \left[0, \frac{L}{c}\right)$  подано на рис. 1.

Складова похибки непрямого вимірювання кута наряду на ціль, зумовлена похибкою вимірювання різниці часу фіксації звукових хвиль цілей звукоприймачами  $\Delta a_t$ , визначається як:

$$\Delta a_t = \frac{\partial a}{\partial t} \cdot \Delta t = \arcsin' \left( \frac{\Delta t \cdot c}{L} \right) \cdot \frac{c}{L} \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left( \frac{\Delta t \cdot c}{L} \right)^2}} \cdot \frac{c}{L} = \frac{c \cdot \Delta t}{\sqrt{(L - \Delta t \cdot c) \cdot (L + \Delta t \cdot c)}}, \quad (5)$$

де  $\Delta t$  – похибка вимірювання різниці часу фіксації звукових хвиль цілей звукоприймачами;  $\frac{\partial a}{\partial t}$  – часткова похідна залежності (3) за змінною  $t$ .

Якщо використовувати як звукоприймачі мобільні пристрої та синхронізувати їх із системним часом базової станції оператора стільникового зв'язку, абсолютна похибка вимірювання часу кожним звукоприймачем не перевищує  $\pm 0,5$  с. Тоді границя абсо-

люотної похибки вимірювання різниці часу фіксації звукових хвиль цілей звукоприймачами  $\Delta t = \pm 1$  с.

Графік залежності складової похибки  $\Delta a_t$  для умов, ідентичних з дослідженням складової похибки  $\Delta a_L$ , наведено на рис. 2. Графік обмежений значенням похибки кута в один радіан для зручності аналізу графіка за автоматичного масштабування, з урахуванням того, що таке значення похибки неприйнятно високе для розроблюваної системи.

Складова похибки непрямого вимірювання кута наряду на ціль, зумовлена похибкою врахування швидкості поширення звуку та її нерівномірністю в різних напрямках, спричиненою дією вітру  $\Delta a_c$ , визначається як:

$$\Delta a_c = \frac{\partial a}{\partial c} \cdot \Delta c = \arcsin' \left( \frac{\Delta t \cdot c}{L} \right) \cdot \frac{\Delta t}{L} \cdot \Delta c = \frac{\Delta c}{\sqrt{1 - \left( \frac{\Delta t \cdot c}{L} \right)^2}} \cdot \frac{\Delta t}{L} = \frac{\Delta c \cdot \Delta t}{\sqrt{(L - \Delta t \cdot c) \cdot (L + \Delta t \cdot c)}}, \quad (6)$$

де  $\Delta c$  – похибка вимірювання різниці часу фіксації звукових хвиль цілей звукоприймачами;  $\frac{\partial a}{\partial c}$  – часткова похідна залежності (3) за змінною  $c$ .

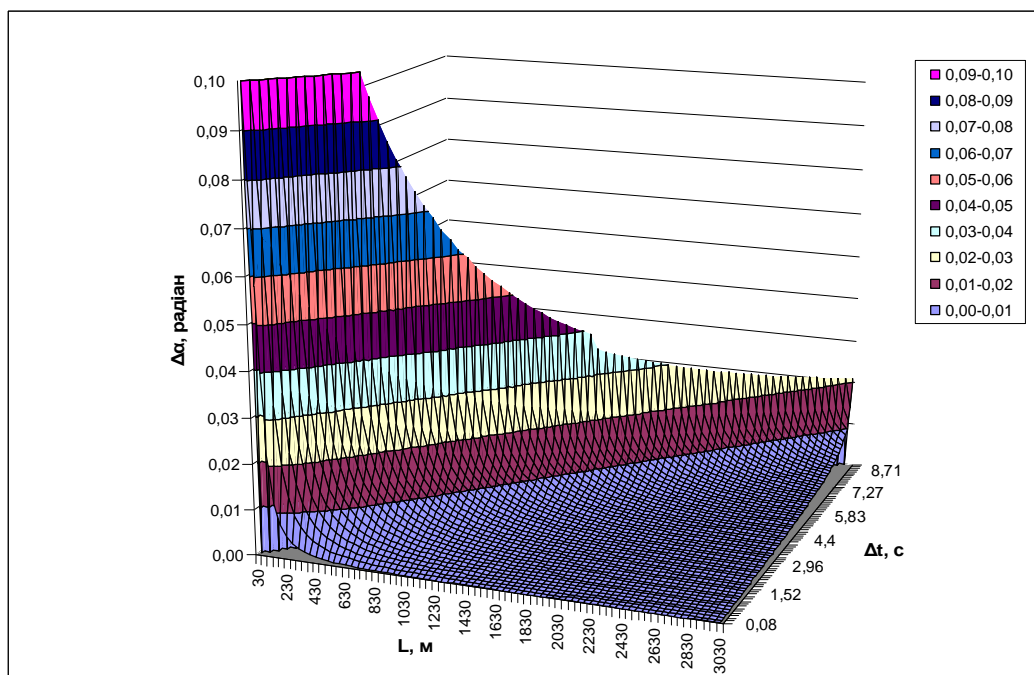


Рис. 1. Залежність складової похибки  $\Delta a_L$  від довжини акустичної бази  $L$  та різниці часу  $\Delta t$

Fig. 1. Dependence component of error  $\Delta a_L$  from length of acoustic base and time difference  $\Delta t$

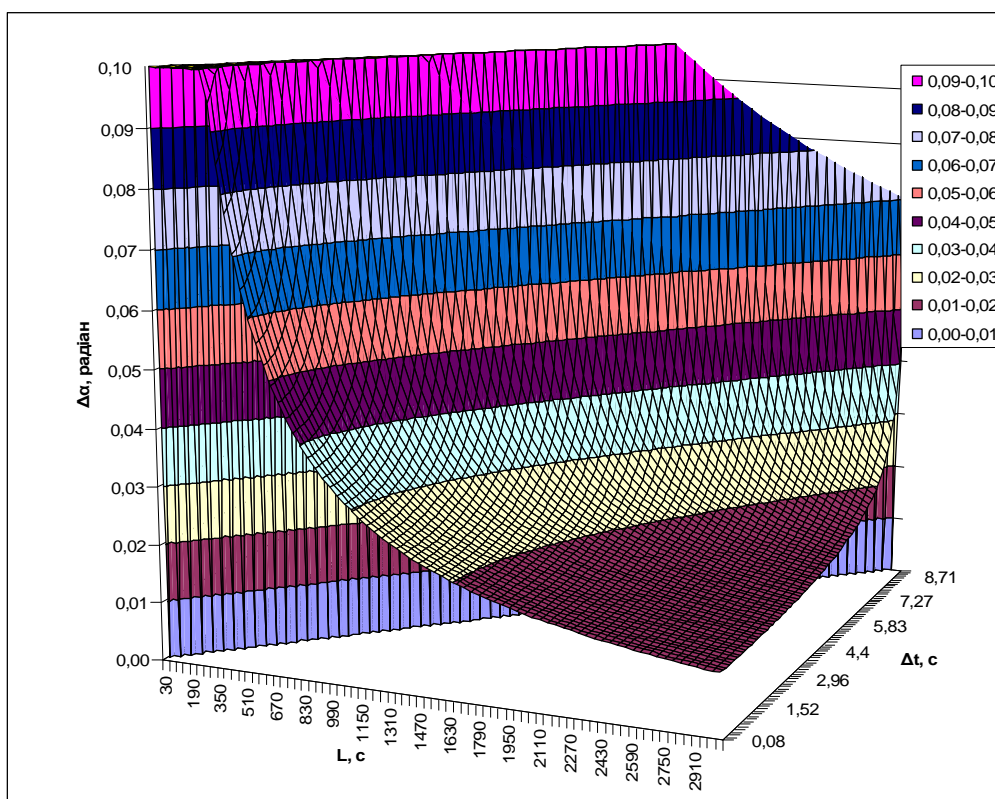


Рис. 2. Залежність складової похибки  $\Delta a_t$  від довжини акустичної бази  $L$  та різниці часу  $\Delta t$

Fig. 2. Dependence component of error  $\Delta a_t$  from length of acoustic base  $L$  and time difference  $\Delta t$

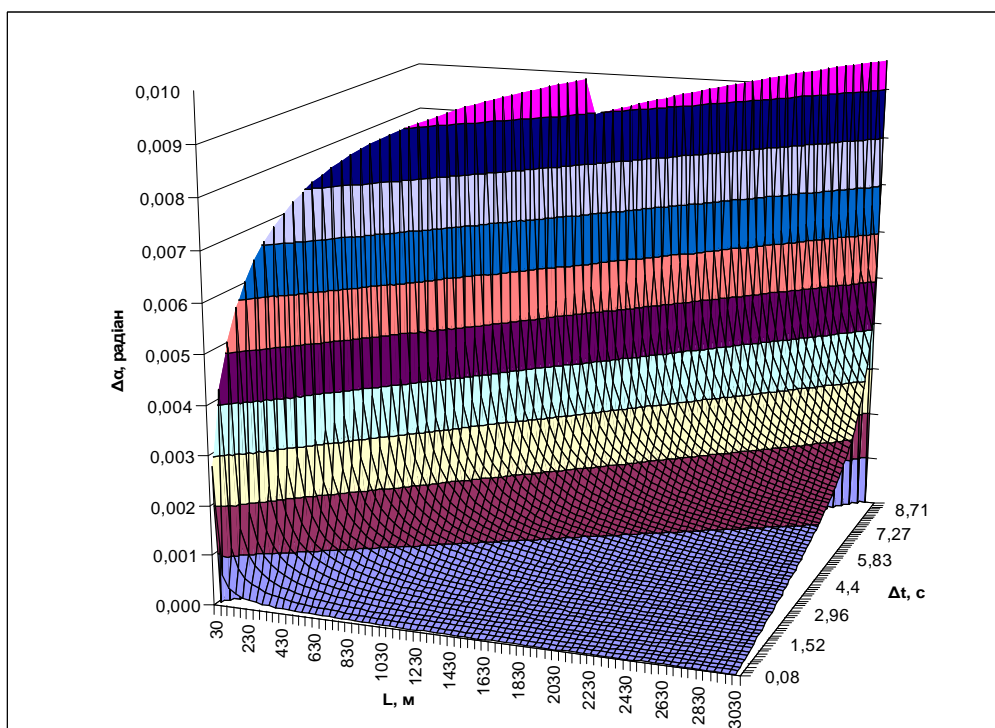


Рис. 3. Залежність складової похибки  $\Delta a_c$  від довжини акустичної бази  $L$  та різниці часу  $\Delta t$

Fig. 3. Dependence component of error  $\Delta a_c$  from length of acoustic base  $L$  and time difference  $\Delta t$

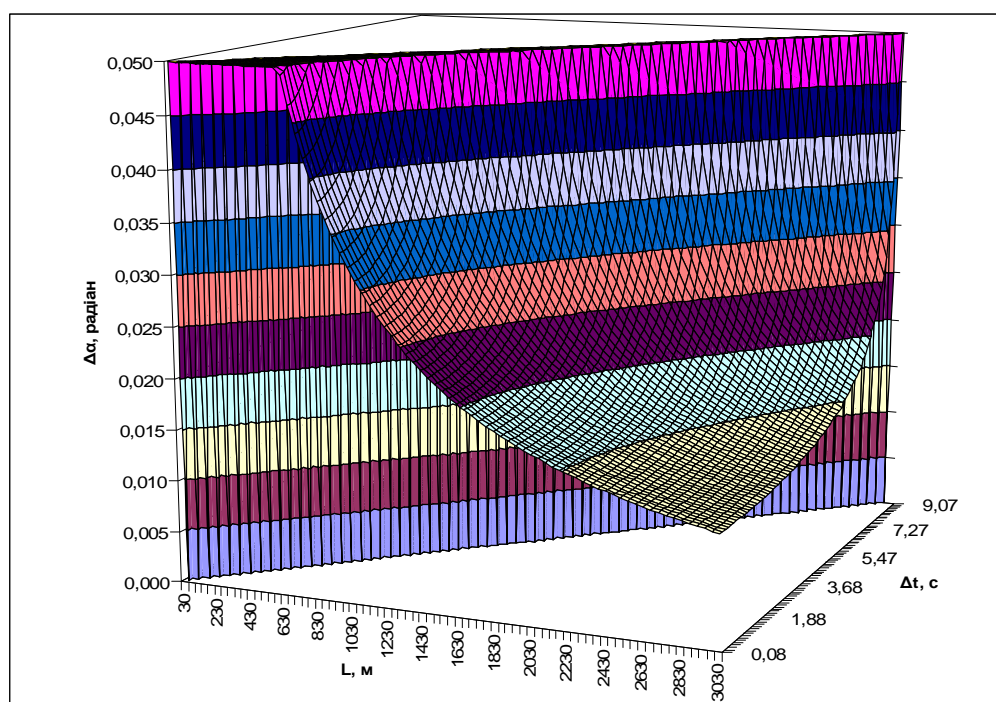
Рис. 4. Залежність результуючої похибки  $\Delta a$  від довжини акустичної бази  $L$  та різниці часу  $\Delta t$ 

Fig. 4. Dependence component of error from length basis and acoustic time difference

У разі зміни температури навколишнього середовища від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  швидкість звуку в повітрі змінюється в межах від  $325,2\text{ м/с}$  до  $349,0\text{ м/с}$  [8], що відповідає відносній похибці  $\pm 3.5\%$ . Така похибка неприйнятно висока, тому необхідно здійснювати температурну корекцію враховуваної в залежності (3) швидкості вітру. Якщо ця корекція забезпечує похибку  $\Delta c = \pm 0,5\text{ м/с}$  [5], то графік залежності складової похибки  $\Delta a_c$  для умов, ідентичних з дослідженням складової похибки  $\Delta a_L$ , подано на рис. 3.

Оскільки розглянуті у (4)...(6) складові похибки є незалежними величинами [7], то результуючу похибку непрямого вимірювання кута напрямку на ціль можна оцінити як

$$\Delta a = \sqrt{\Delta a_L^2 + \Delta a_{\Delta t}^2 + \Delta a_c^2}. \quad (7)$$

Графік залежності похибки  $\Delta a$  представлено на рис. 4.

На ньому можна виділити три основні, з погляду розроблення топології системи звукової артилерійської розвідки, ділянки, наведені на рис. 5:

1.  $\Delta a < 0,015$  (відстань від  $1500\text{ м}$  на рис. 5), коли розроблена систем забезпечує точність визначення кута напрямку на ціль, аналогічну з прототипом – станцією АЗК-7 [2].

2.  $\Delta a \in (0,015, 0,05)$  (відстань від  $700$  до  $1500\text{ м}$  на рис. 5), коли за рахунок методів статистичного оброблення результатів вимірювання для декількох акустичних баз, утворених певною множиною звукоприймачів, можна досягти точності, співмірної з прототипом.

3.  $\Delta a > 0,05$  (відстань від  $30$  до  $700\text{ м}$  на рис. 5), коли точність системи надто низька.

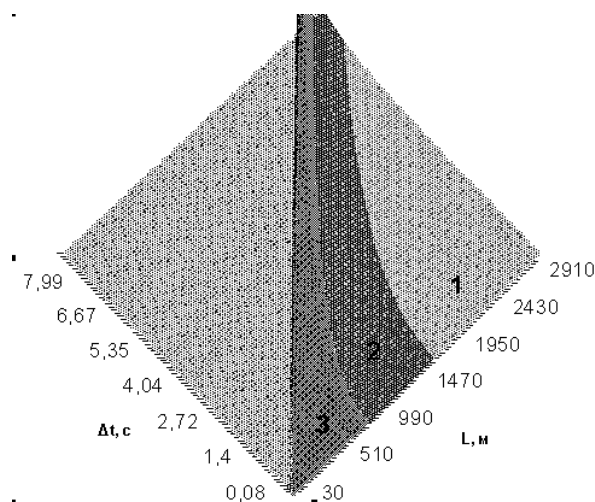


Рис. 5. Ділянки доцільного використання розробленої системи

Fig. 5. Lots appropriate use of the developed system



**Висновки.** Вимірювання кута напрямку на ціль розподіленою системою звукової артилерійської розвідки є непрямим вимірюванням, похибка якого визначається похибками прямих вимірювань географічних координат звукоприймачів, часу фіксації ними звукових хвиль цілей. Досліджено похибку вимірювання кута напрямку на ціль та її компонентів та виявлено, що домінує вплив похибки, спричиненої похибкою вимірювання часу звукоприймачами, що робить доцільною їхню синхронізацію не з системним таймером мережі стільникового зв'язку, а з таймерами задіяних GPS сенсорів, хоча інтерфейс такої синхронізації не стандартизували виробники мобільних пристроїв. Інший можливий шлях підвищення точності вимірювання часу звукоприймачами – використання внутрішніх апаратних або програмних таймерів, запуск яких синхронізується із системним таймером мережі стільникового зв'язку. Аналіз результуючої похибки вимірювання кута напрямку на ціль дав змогу виділити доцільні, з погляду забезпечення необхідної точності, конфігурації розміщення звукоприймачів на місцевості, що необхідно враховувати під час розроблення топологічної схеми системи.

*1. Кривошеєв А. М. Основи артилерійської розвідки: навч. посіб. / А. М. Кривошеєв, В. М. Петренко,*

*А. І. Приходько – Суми: Сумський державний університет, 2014. – 393 с. 2. АЗК-7 – Вікіпедія. Режим доступу: <http://uk.wikipedia.org/wiki/АЗК-7>. 3. Устименко О. В. Перспективи щодо створення розвідувально-ударних комплексів на базі існуючих РСЗВ: зб. тез доповідей наук.-техн. конференції “Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ”. 5–6 листопада 2014 р. – С. 203–206. 4. Кочан Р. В., Трембач Б. Р. Концепція розподіленої автоматичної системи звукової артилерійської розвідки на базі стільникового зв'язку // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К., 2016. – № 1(25). – С. 59–63. 5. Кочан Р. В., Трембач Б. Р. Оцінка похибки вимірювання напрямку на ціль розподіленою системою звукової артилерійської розвідки // Електроніка та інформаційні технології: 8-ма Україно-польська науково-практична конференція. – Чинадієво, 2016. – С. 110–112. 6. Географічна відстань – Вікіпедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Географічна\\_відстань](https://uk.wikipedia.org/wiki/Географічна_відстань). 7. Дорожжовець М. Опрацювання результатів вимірювань: навч. посіб. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2007. – 624 с. 8. Швидкість звуку – Вікіпедія. – Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкість\\_звуку](http://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкість_звуку).*