

УДК 534.8

С.О. Козерук, І.В. Котвицький

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПРЕДМЕТІВ У ПОВІТРІ

В статті розглянуто питання використання інтенсивного ультразвуку для переміщення легких предметів в повітрі. Ультразвуковий промінь генерується круглою матрицею випромінювачів. Промінь має три фокальні області, формується з використанням фазових затримок, які вводяться у функцію збудження випромінювачів. Проведені розрахунки інтенсивності ультразвуку та радіаційного тиску в фокальних областях. Приведені результати експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** дисковий матричний випромінювач, ультразвуковий трьох ступеневий промінь, радіаційний тиск, переміщення у повітрі.

### Вступ

Сучасні мультимедійні системи та комп'ютерні ігрові приставки дають можливість відображати віртуальні образи та ситуації і потребують нових пристроїв, які б створювали тактильні відчуття і давали можливість інтерактивно приймати участь у комп'ютерних іграх або змаганнях. Маніпуляція фізичними об'єктами на інтерактивних табло досягається за допомогою використання фізичних полів різної природи, наприклад магнітного або ультразвукового. Магнітні поля створюються спеціальними пристроями, які управляються дистанційно. Одним з прикладів реалізації є система Zegon [1], яка використовує рухливий електромагніт для левітації і маніпулювання одним об'єктом. Недоліком такої системи є те, що її важко пристосувати для маніпулювання кількома матеріальними об'єктами одночасно. Вчені університету Брістоля [2] розробили ультразвуковий пристрій, який переміщує матеріальні об'єкти невеликої ваги у повітрі в площині XY. Пристрій являє собою прямокутні антенні решітки ультразвукових перетворювачів-матриці випромінювачів, які розташовані по контуру інтерфейсу. Керування параметрами генерування ультразвуку здійснюється за допомогою процесорів X MOS. Недоліком такого пристрою є обмеження переміщення по третій координаті Z.

Останнім часом для переміщення легких об'єктів у повітрі використовують ультразвук великої потужності. Інтенсивний ультразвук [3] створює радіаційний тиск, здатний розвивати постійно діючу силу на поверхні перешкод. У роботах [4, 5] наведені пристрої силової дії, основним елементом яких є матриці ультразвукових випромінювачів. Приведені результати експериментальних досліджень, які підтвердили можливість створення ультразвуком силової дії в повітрі достатньої для переміщення легких об'єктів.

Основною перевагою ультразвукового методу є можливість створення локальної силової дії зі ска-

нуванням по простору. В роботі [6] запропоновано чисельний алгоритм розрахунку ультразвукового поля плоского випромінювача. Метод був розвинутий для масивів випромінювачів кінцевого розміру [7]. Отримані результати використовувалися при створенні ультразвукового пристрою силової дії, представлено в роботі [8]. В роботі приведено розрахунки радіаційного тиску і розподілу ультразвукового тиску в області фокусування та описано фізичний пристрій. Ультразвук генерується матрицею з 172 повітряних випромінювачів, що працюють на частоті 40 кГц. Управління променем здійснюється програмно з персонального комп'ютера. Радіаційний тиск в точці фокусування склав 57 Па і дозволив переміщувати легкі предмети. Фазове сканування ультразвуковим променем у просторі [9] приводить до його розширення і відповідно до зменшення радіаційного тиску. Дослідження ультразвукових полів в повітрі, розробка алгоритмів їх формування та сканування є нагальною проблемою сьогодні.

Метою роботи є комп'ютерне та фізичне моделювання ультразвукового променя з трьома фокальними областями, який створюється дисковим матричним випромінювачем, описаним в роботі [8]. Порівняння отриманих експериментальних та розрахункових характеристик ультразвукового променя. Проведення експерименту по програмному керуванню трьох ступеневим переміщенням пінопластового диску у повітрі.

### 1. Радіаційний тиск ультразвуку

Відомо [3], що ультразвук створює радіаційний тиск  $P_r$ . Величина радіаційного тиску пропорційна щільності звукової енергії  $I$ , яка залежить від ультразвукового тиску  $p$ , щільності  $\rho$  і швидкості звуку  $c$  в середовищі:

$$P_r = I = \frac{p^2}{\rho c^2}.$$

Якщо на шляху поширення ультразвукових хвиль поставити перешкоду, то на його поверхню діє радіаційний тиск:

$$P_r = (1 + \xi^2)I = (1 + \xi^2) \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

Величина радіаційного тиску залежить від співвідношення акустичних імпедансів перешкоди  $Z_2$  і середовища  $Z_1$ , і визначається коефіцієнтом відображення по тиску  $\xi$ :

$$\xi = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Для більшості перешкод у повітрі коефіцієнт,  $\xi=1$ , тому радіаційний тиск визначається співвідношенням:

$$P_r = (1 + \xi^2)I = 2 \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (2)$$

Розрахуємо радіаційний тиск, який створює типовий ультразвуковий випромінювач. Частота випромінювача дорівнює 40 кГц; ультразвуковий тиск  $P = 20$  Па на відстані 300 мм при ефективній електричній напрузі  $U=10$  В. Параметри повітря  $\rho = 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $c = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Розрахунковий по (2) радіаційний тиск дорівнює

$$P_r = 0.0054 \text{ Па} = 0.000055 \frac{\text{Г}}{\text{см}^2}$$

для переміщення предметів в повітрі. Відомо, що мінімальний тиск, необхідний для відчуття дотику ,

становить  $(0.2-0.5) \frac{\text{Г}}{\text{см}^2}$ . Нижче наведена табл. 1

розрахованих значень радіаційного тиску і необхідного ультразвукового тиску і його рівня, пов'язаних співвідношенням:

$$L = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ дБ}; p_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Па} .$$

Таблиця 1

Результати розрахунків

Радіаційний тиск $P_r$ , Гсм <sup>2</sup> або (Па)	Ультразвуковий тиск $p$ , Па	Рівень тиску $L$ , дБ
0.0055 (0.54)	200	140
0.055 (5.4)	632	150
0.55 (54)	2000	160
5.5 (540)	6324	170

Для отримання тиску, достатнього для створення силової дії, слід збільшити ультразвукову енергію,

використовуючи деяку кількість випромінювачів. Як приклад, приведемо розрахунок кількості випромінювачів  $N$  з рівнем випромінювання  $L_i=115$  дБ для отримання ультразвуку  $L_\Sigma = 160$  дБ, взятий із [8].

$$L_\Sigma = 20 \lg \left( \sum_{i=1}^N 10^{0.05 L_i} \right) = 20 \lg (N 10^{0.05 L_i}) = \quad (3)$$

$$= L_i + 20 \lg N; N = 10^{0.05(L-L_i)} = 10^{2.25} = 178.$$

Використовуючи 178 випромінювачів, можна отримати на відстані рівному 300 мм радіаційний тиск  $P_r=0.55 \frac{\text{Г}}{\text{см}^2}$ , виконавши умову фазового збігу коливань, що приходять від дискретних випромінювачів. Подальше збільшення радіаційного тиску може бути досягнуто фокусуванням ультразвукового поля, створюваного матрицею дискретних випромінювачів.

## 2. Розрахунок трьохступеневого ультразвукового променя

Для трьох ступеневого переміщення об'єкту у повітрі скористуємось дисковим матричним випромінювачем, технічні характеристики якого наведені в роботі [8]. Для трьох точок фокусування  $F=200$  мм; 250 мм; 300 мм розрахуємо по числовому алгоритму, запропонованому у тій же роботі, розподіл ультразвукового тиску по осі матричного випромінювача (рис. 1).

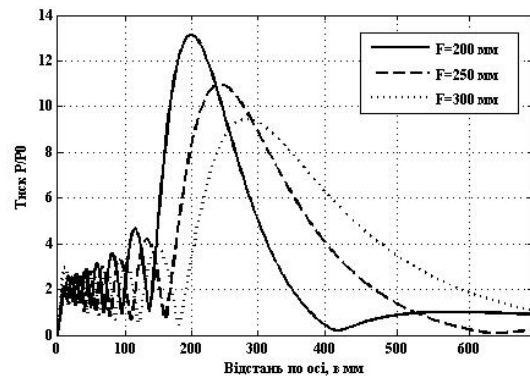


Рис. 1. Розподілення тиску по осі матричного дискового випромінювача

Треба зауважити, що максимум тиску (фокус) зміщується в сторону поверхні матричного випромінювача за рахунок дифракції хвиль і не співпадає з положенням заданих точок фокусування. Проведемо оцінку рівня ультразвуку в першій фокальній точці. Ультразвуковий тиск у фокусі  $P_F$  перевищує середнє значення тиску на поверхні випромінювача  $P_0$  в  $\frac{P_F}{P_0} = 13$  раз, що дорівнює збільшенню рівня тиску на величину  $\Delta L$ :

$$\Delta L = 20 \lg \left( \frac{P_F}{P_0} \right) = 22 \text{ дБ} .$$

Прийmemo за середній рівень випромінювання на поверхні матриці рівень ультразвуку частотою 40кГц (довжина хвилі  $\lambda = 8.5\text{мм}$ ) дискретного перетворювача діаметром  $d = 12.6\text{мм}$  на межі області Френеля  $r_f = 0.25d^2\lambda^{-1} = 4.7\text{мм}$ . Врахуємо також зменшення тиску у сферичній хвилі пропорційно відстані від джерела. Знаючи рівень тиску дискретного випромінювача  $L_i = 115$  дБ на відстані  $R_i = 300$  мм, розрахуємо рівень тиску на межі зони Френеля:

$$L_0 = L_i + 20\lg\left(\frac{R_i}{r_f}\right) = 115 + 20\lg\left(\frac{300}{4.7}\right) = 151\text{дБ}.$$

Враховуючи чинник фокусування, що визначається добавкою  $\Delta L$ , знайдемо рівень тиску  $L_F$  в точці фокусування:

$$L_F = L_0 + \Delta L = 173\text{дБ}.$$

Розрахунок ультразвукового тиску для двох інших точок фокусування проводиться аналогічно, із залученням графіку розподілу тиску для різних значень фокусної відстані (рис. 1). Ультразвуковий тиск у другому та третьому фокусах перевищує значення на поверхні матриці в 11 та 9 раз відповідно. Результати розрахунків рівня ультразвуку та величини радіаційного тиску приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Числові значення рівня ультразвуку та величини радіаційного тиску

Фокальна відстань $F$ , мм	200		250		300	
	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент
Рівень $L_F$ , дБ	173	166	172	165	170	164
Радіаційний тиск $P_r$ , Гс $m^2$	10.9	2.18	8.67	1.76	5.5	1.37

Розрахований рівень ультразвукового тиску при триступеновому фокусуванні, у відповідності до табл. 2, дозволить отримати радіаційний тиск  $P_r \geq 1.37$  Г/с $m^2$ , якого достатньо для переміщення легких об'єктів у повітрі.

### 3. Експеримент

Мета проведення експерименту – створити трьох ступеневий ультразвуковий промінь, дати оцінку його довжині, рівню випромінюваного ультразвуку і величині радіаційного тиску. Для проведення експерименту скористаємось установкою, приведеною в [6]. Йдеться про оцінку характеристик ультразвукового поля, а не їх вимір. Це пояснюється відсутністю точних приладів для вимірювання ультразвуко-

вого тиску більше 160 дБ. Для вимірювання тиску використовувався перетворювач Murata40T/R, з робочою частотою 40 кГц та чутливістю в режимі прийому  $\gamma = 5.6\text{мВ/Па}$ . Приймальний перетворювач, встановлений на штативі, переміщався по осі випромінювання матриці в межах (30 – 380)мм.

Експериментальні значення нормованого ультразвукового тиску вздовж осі матриці для трьох точок фокусування приведені на рис. 2.

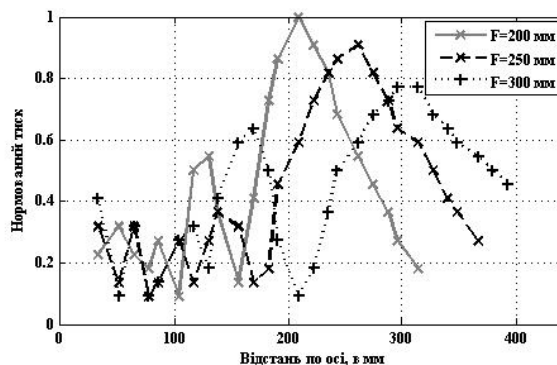


Рис. 2. Заміряний та нормований ультразвуковий тиск по осі матричного дискового випромінювача

Аналізуючи результати розрахунків (рис. 1) і експерименту (рис. 2), можна зробити наступні висновки. Характер розподілу ультразвукового тиску вздовж осі випромінювача та положення максимумів мало відрізняються від розрахункового. Розрахункова та експериментальна довжини трьох ступеневого променя, по рівню спадання на 3 дБ від максимального значення (точка  $F=200$  мм), оцінені в 120 мм.

Ультразвуковий тиск оцінювався у трьох фокусах по електричній напрузі  $U_R$  на виході приймального перетворювача. Рівень ультразвукового тиску знаходився із співвідношення:  $L_F = 20\lg U_R / \gamma p_0$ . Результати вимірювання та розрахунків радіаційного тиску приведені у табл. 2. Розбіжність експериментальних та теоретичних результатів не перевищує 7 дБ і пояснюється відхиленням параметрів випромінювачів від паспортних значень та похибкою при проведенні експерименту.

Рис. 3 ілюструє застосування пристрою для трьох ступеневого підняття пінопластового диску у повітрі. Переключення фокальних областей проводилося програмно за допомогою персонального комп'ютеру.

Висота підняття пінопластового диску змінювалась синхронно із зміною точки фокусування і близька до розрахункової.

### Висновки

Характер розподілу ультразвукового тиску вздовж осі трьох ступеневого променя добре коре-

люється з розрахунковим. Значення рівня тиску в точках фокусування відрізняються не більше ніж на 7 дБ.

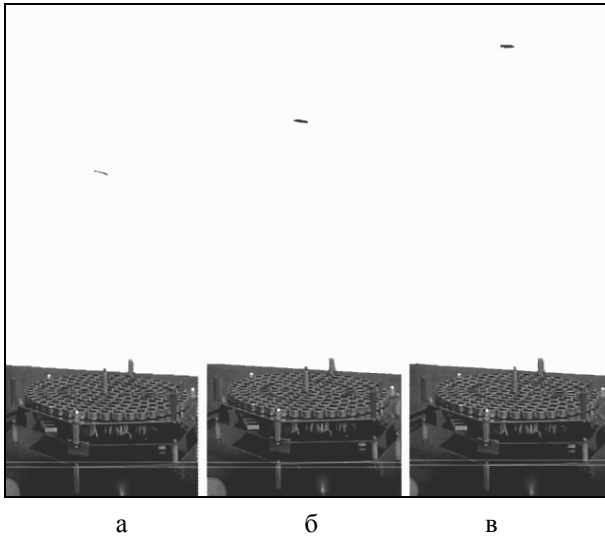


Рис. 3. Експеримент з підняттям пінопластового диску для трьох значень фокальної відстані: а –  $F=200$  мм; б –  $F=250$  мм; в –  $F=300$  мм

Розбіжність експериментальних та теоретичних результатів пояснюється відхиленням параметрів дискретних випромінювачів від паспортних значень та похибкою при проведенні експерименту.

Результати комп'ютерного та фізичного досліджень добре узгоджені між собою, що підтверджує якість розрахункового алгоритму та фізичного експерименту.

Застосування трьох ступеневого фокусування ультразвукового променя дозволяє переміщувати легкі предмети у повітрі. Висота та швидкість переміщення може керуватись програмно з персонального комп'ютеру.

### УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ В ВОЗДУХЕ

С.А. Козерук, И.В. Котвицкий

*В статье рассмотрены вопросы использования интенсивного ультразвука для перемещения легких предметов в воздухе. Ультразвуковой луч генерируется круглой матрицей излучателей. Луч имеет три фокальные области, формируется с использованием фазовых задержек, которые вводятся в функцию возбуждения излучателей. Проведены расчеты интенсивности ультразвука и радиационного давления в фокальных областях. Приведены результаты экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** *дисковый матричный излучатель, ультразвуковой трех ступенчатый луч, радиационный давление, перемещение в воздухе.*

### ULTRASOUND DEVICE FOR THE LIGHT OBJECTS MOVING IN A MID-AIR

S.O. Kozeruk, I.V. Kotvytskyi

*In this article, the issue of the ultrasound use for the light objects moving in a mid-air is examined. Ultrasonic beam is generated by a circular array of transmitters. The beam has three focal points formed by using the phase delays that are introduced into the excitation function of emitters. Calculations of ultrasound intensity and radiation pressure in the focal areas were performed. The results of experimental research are shown in this paper.*

**Keywords:** *matrix transmitter, the ultrasonic beam, radiation pressure, phase beam scanning.*

### Список літератури

1. Jinha Lee, Rehmi Post, Hiroshi Ishii: *ZeroN: Mid-Air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation: [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://tangible.media.mit.edu/project/zeron-levitated-interaction-element/>.*
2. Mark T. Marshall, Tom Carter, Jason Alexander, Sriram Subramanian: *Ultra-Tangibles: Creating Movable Tangible Objects on Interactive Tables // Proceedings of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2012)-May 2012.*
3. Bergman L. *Der Ultraschall and seine Anwendung in Wissenschaft und Technik / L.Bergman. – Zurich, 1954. – 858 p.*
4. Hoshi T.: *Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System / T. Hoshi // IEEE World Haptics (2011). – P. 569-573.*
5. Hoshi T.: *Development of Portable Device of Airborne Ultrasound Tactile Display / T. Hoshi // SICE Annual Conference - August 20-23, 2012, Akita University. – Akita, Japan.*
6. Kozeruk S. *Modeling of focused acoustic field of plane matrix oscillator / S.Kozeruk // Proceedings of the 31 International Scientific-Technical Conference Electronics and Nanotechnology, April 12-14, 2011. – Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 171.*
7. Kozeruk S. *Modeling of acoustic beam for location with high resolution / S. Kozeruk // 5th International Universal Communication Symposium, October 12-14, 2011. – Gumi, Korea, 2011.*
8. Kozeruk S. *Computer Technology in Modeling and Experiment Problems with Powerful Ultrasound in Air / S. Kozeruk, O. Kratko, G. Pukha // Computer Technology and Application. – 2013. – Vol 4. – P. 17-22.*
9. Козерук С. *Особенности использования ультразвука для тактильного вещания / С. Козерук, И. Котвицкий // Системи обробки інформації. – X: ХУПС, 2013. – Вип. 7(114). – С. 19-23.*

Надійшла до редколегії 26.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Г. Лейко, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.