

УДК 534-8

С.А. Козерук, И.В. Котвицкий

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ТАКТИЛЬНОГО ВЕЩАНИЯ

Современные телекоммуникационные системы предполагают передачу невербальной информации с целью большей эффективности сообщений. Передача ощущений касания получила название тактильного вещания. В статье рассмотрены особенности генерации матричным излучателем в воздухе фокусированного ультразвука, создающего силовое действие на препятствии и вызывающее у человека тактильное ощущение. Приведен пример расчета радиационного давления для дискового матричного излучателя. Исследована зависимость характеристик фокусированного ультразвукового поля и радиационного давления от угла пространственного сканирования.

Ключевые слова: матричный излучатель, ультразвуковой луч, радиационное давление, фазовое сканирование лучом.

Введение

В последнее время, в связи с разработкой 3Д телевидения, компьютерных игровых приставок при взаимодействии человека с виртуальным изображением возникла необходимость в обеспечении тактильной обратной связи (tactile force feedback), которая помогла бы усилить реалистичность ощущений. Передача ощущений касания получила название тактильного вещания (haptic broadcasting). Трансляция невербальной информации на расстоянии позволяет увеличить эффективность коммуникативных систем, расширяет спектр информационных каналов, создаст у пользователя эффект виртуальной реальности.

Для силового действия на тело человека предлагается ряд решений на основе устройств различного принципа действия. Применение вибрационных тактильных стимуляторов [1] ограничено рядом факторов. Носимые устройства сковывают движение, вызывают ощущение касания из-за контакта между кожей и стимулятором. Воздушные струи [2] избавлены от указанных недостатков, однако из-за рассеяния воздушного потока не позволяют локали-

зовать тактильное действие. Известны работы [3 – 7] по созданию тактильного действия с помощью мощного ультразвука в воздухе. Интенсивный ультразвук [4] создает радиационное давление, способное развивать постоянно действующую силу на поверхности препятствий. В работах [5 – 7] описаны устройства тактильной стимуляции, основным элементом которых является матрица воздушных ультразвуковых излучателей. Введением фазовой задержки в цепи излучения матрицы обеспечивается фокусировка ультразвука в некоторой области пространства. Приведены расчеты радиационного давления и распределения ультразвукового давления в области фокусировки. Описаны физические модели устройств и проведены экспериментальные исследования. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность создания ультразвуком силового действия в воздухе, достаточного для получения тактильного ощущения.

Ультразвуковое тактильное устройство [8] может дополнить графический планшет, передавая одновременно с символами и знаками невербальную информацию (эмоции, ощущения) непосредственно на тело человека. Соответствие тактильного действия

ультразвука ощущения человека исследовалось в работе [9]. Ciglar [10] предлагает использовать ультразвуковое устройство для дополнения музыкального инструмента тактильной обратной связью.

Основным достоинством ультразвукового метода является возможность создания локального силового действия со сканированием по пространству. Исследование ультразвуковых полей, фокусированных в воздухе, разработка алгоритмов их формирования и сканирования представляется актуальным. В работе [11] предложен численный алгоритм расчета ультразвукового поля плоского излучателя. Метод был развит для массивов излучателей конечного размера [12]. Полученные результаты были применены для создания ультразвукового устройства силового действия, представленного в работе [13]. Ультразвук генерируется матрицей из 172 воздушных излучателей, работающих на частоте 40 кГц. Управление лучом осуществляется программно с персонального компьютера. Радиационное давление в точке фокусировки составило 57 Па и позволило перемещать легкие предметы и ощущать тактильное действие ультразвука.

Проблема тактильного вещания предполагает решение ряда задач генерации интенсивного ультразвука, создания матриц излучателей с электронным управлением лучом, расчета характеристик ультразвукового поля и построения алгоритмов сканирования, управления характеристиками ультразвука с целью получения тактильных ощущений у пользователя. В статье рассмотрен вопрос моделирования фокусированного ультразвукового поля дискового матричного излучателя с учетом ведения фазового сканирования по пространству. Рассчитаны зависимости параметров луча от угла сканирования и его влияние на создаваемое радиационное давление.

1. Радиационное давление ультразвука

Известно [4], что ультразвук создает радиационное давление P_r . Величина радиационного давления пропорциональна плотности звуковой энергии I , которая зависит от ультразвукового давления p , плотности ρ и скорости звука c в среде:

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

Если на пути распространения ультразвуковых волн поставить препятствие, то на его поверхность действует радиационное давление:

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

Величина радиационного давления зависит от соотношения акустических импедансов препятствия

Z_2 и среды Z_1 , и определяется коэффициентом отражения по давлению ξ :

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

Для большинства препятствий в воздухе коэффициент $\xi=1$, поэтому радиационное давление определяется соотношением:

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

Рассчитаем радиационное давление, создаваемое на препятствии в воздухе

$$\left(\rho = 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; c = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

ультразвуковым излучателем с типичными техническими характеристиками. Частота излучателя $f = 40$ кГц; ультразвуковое давление $p = 20$ Па на расстоянии 300 мм от поверхности излучателя при подводимом эффективном электрическом напряжении $U = 1$ В.

Рассчитанное по (2) радиационное давление составило $P_r = 0.0054$ Па = 0.000055 Г/см². Эта величина весьма мала для создания тактильного ощущения. Известно, что минимальное давление, воспринимаемое как касание, составляет $0.2-0.5$ Г/см². Ниже приведена табл. 1 значений радиационного давления и требуемого ультразвукового давления и его уровня, связанных соотношением:

$$L = 20 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ дБ}; P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}.$$

Таблица 1

Значения радиационного давления

Радиационное давление P_r , Г/см ² или (Па)	Ультразвуковое давление p , Па	Уровень излучения 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 получения давления касания следует увеличить ультразвуковую энергию, используя некоторое количество излучателей. В качестве примера рассчитаем количество излучателей N с уровнем излучения $L_i = 120$ дБ для получения уровня излучения $L_\Sigma = 160$ дБ:

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

$$= L_i + 20 \lg N; N = 10^{0.05(L - L_i)} = 10^2 = 100.$$

Используя 100 излучателей, можно получить на расстоянии, равном 300 мм, радиационное давление $P_r=0.55 \text{ Г/см}^2$, выполнив условие фазового совпадения колебаний, приходящих от дискретных излучателей. Дальнейшее увеличение радиационного давления может быть достигнуто фокусировкой ультразвукового поля, создаваемого матрицей дискретных излучателей. Как показано в работах [11, 12, 14], величина усиления звукового давления в фокусе может существенно превысить значение, полученное за счет синфазной интерференции вкладов массива преобразователей. Однако следует помнить, что характеристики ближнего поля зависят от геометрии матрицы, волнового расстояния между элементами и коэффициента фокусировки. Ширина и протяженность основного лепестка излучения – ультразвукового луча – растет с увеличением коэффициента фокусировки, а плотность ультразвуковой энергии и радиационное давление падают. Исследуем зависимость характеристик луча от углов сканирования в пространстве на примере дискового матричного излучателя.

2. Исследование ультразвукового поля

Интеграл Рэлея дает принципиальную возможность вычислить потенциал поля в любой точке полупространства. Решение получают представлением интеграла в виде бесконечных степенных рядов, сходимость которых зависит от расстояния до излучателя. Для области вблизи излучателя ряды сходятся плохо. В области, удаленной от излучателя, решение находится с помощью интеграла Френеля. На больших удалениях пользуются асимптотическими приближениями. С появлением компьютерной техники, позволяющей производить большой объем вычислений, эффективными стали численные методы решения задач излучения.

2.1. Численная модель

Для расчета фокусированного ультразвукового поля будем использовать декартову систему координат (x, y, z) , расположенную в центре излучающей матрицы с апертурой D (рис. 1). Матрица состоит из $N \cdot M$ дискретных излучателей малого волнового размера ΔS , расположенных в узлах координатной сетки. Шаг между излучателями $\Delta x = \Delta y$. Колебательная скорость дискретных излучателей V_{nm} задается функцией распределения W_{nm} относительно значения скорости V_0 в центре матрицы:

$$W_{nm} = \frac{V}{V_0}.$$

Излучение происходит в полупространство с волновым сопротивлением ρc .

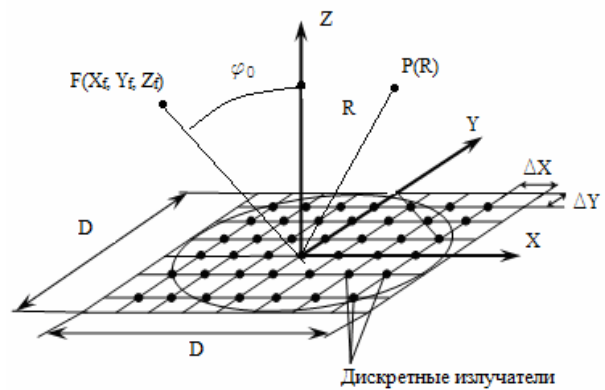


Рис. 1. Расчетная модель матричного излучателя

Фокусировка в точку пространства $F(X_f, Y_f, Z_f)$ обеспечивается введением временных задержек в функцию возбуждения излучателей. Пространственная задержка ΔR_{nm} для произвольного дискретного излучателя с номером nm рассчитывается как: $\Delta R_{nm} = R_{max} - R_{nm}$, где R_{max} и R_{nm} максимальное и текущее значения расстояний до точки фокусировки. Давление излучения $p(R)$ в произвольной точке наблюдения, нормированное к $p_0 = \rho c V_0$, определяется численно:

$$p(R) = \frac{\Delta S}{\lambda} \sum_n^N \sum_m^M W_{nm} \frac{\exp(-jk(R_{nm}^* + \Delta R_{nm}))}{R_{nm}^*}, \quad (4)$$

где $\Delta S, \lambda$ – площадь дискретного излучателя и длина волны; R_{nm}^* – расстояние от дискретного излучателя с номером nm до точки наблюдения.

Проведем расчеты ультразвукового луча дисковой матрицы с апертурой $D = 16\lambda$, шагом $\Delta x = \Delta y = 0.5\lambda$ и $W_{nm} = 1$ для различных значений угла сканирования ϕ_0 .

2.2. Сканирование лучом

В работе [11] приведена зависимость ширины луча от апертуры дисковой матрицы, фокусированной в точку $F(0, 0, Z_f)$. Сечение луча в фокусе представляет собой окружность диаметром $d = \lambda K_f$. Ширина практически не изменяется с увеличением апертуры матрицы для фиксированного значения коэффициента фокусировки $K_f = \frac{Z_f}{D}$. При отклонении луча – сканировании луча – на угол ϕ_0 расстояние до фокуса увеличивается, коэффициент фокусировки возрастает:

$$K_f = \frac{Z_f}{D \cdot \cos \phi_0}.$$

Как показано в работах [11, 12], увеличение коэффициента фокусировки приводит к увеличению сечения и протяженности ультразвукового луча. Величина звукового давления в фокусе $p(F)$ рассчитывается через величину давления на поверхности из-

лучателя p_0 [14] и уменьшается при сканировании:

$$p(F) = p_0 \frac{\pi D}{4 \lambda K_f} = p_0 \frac{\pi D^2 \cos \phi_0}{4 \lambda Z_f} \quad (5)$$

На рис. 2, а б в качестве примера приведены растровые изображения сечения ультразвукового луча в аксиальной плоскости для двух углов сканирования $\phi_0 = 0^0, 45^0$ соответственно.

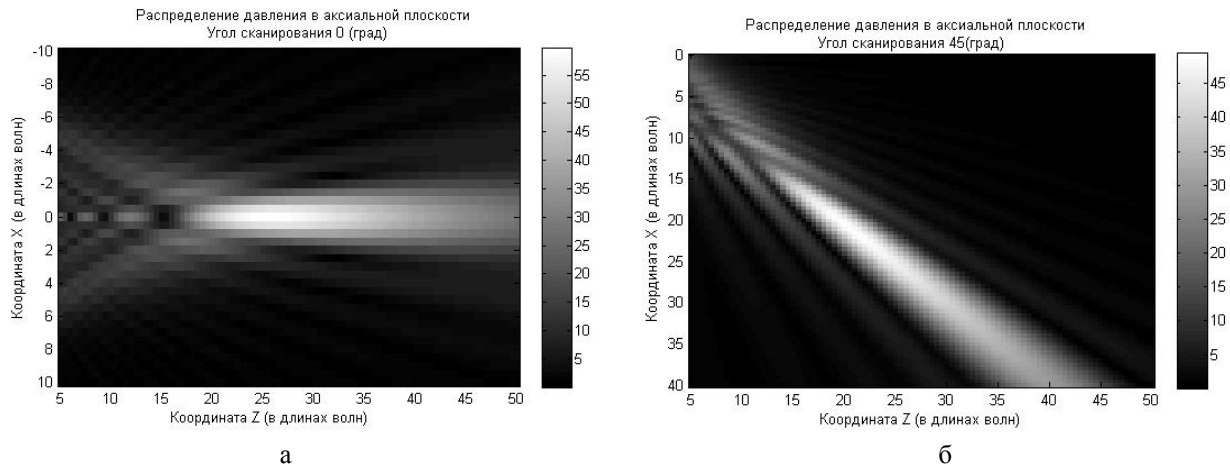


Рис. 2. Сечение ультразвукового луча в плоскости: а – перпендикулярной поверхности излучателя, б – проходящей через его ось

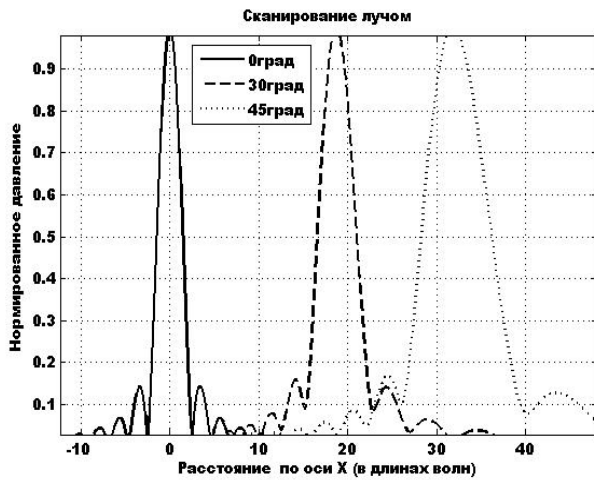


Рис. 3. Расширение луча при сканировании

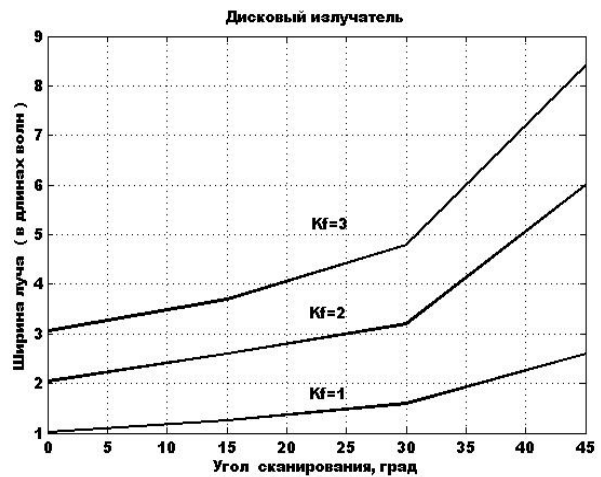


Рис. 4. Зависимость ширины луча от угла сканирования

3. Анализ полученных результатов

Величина давления в сфокусированном ультразвуковом луче зависит от угла сканирования и может быть найдена из выражения (5). Оценить величину давления излучения можно и по растровым графикам (рис. 2, а, б). Например, для координаты $z = Z_f = 32\lambda$ отношение давлений в фокальной области для углов $\phi_0 = 45^0$ и $\phi_0 = 0^0$ оценивается величиной 0.7 и соответствует закону $\cos \phi_0$.

На рис. 3 приведены кривые распределения давления для начального значения $K_f=2$ в зависимости от угла сканирования $\phi_0 = 0^0, 30^0, 45^0$. Увеличение угла приводит к расширению луча при незначительном изменении уровня боковых лепестков. Оценить ширину луча для трех значений коэффициента фокусировки $K_f = 1, 2, 3$ можно по кривым, приведенным на рис. 4.

Как следует из выражения (2), радиационное давление пропорционально квадрату давления излучения. Уменьшение величины ультразвукового давления в 1,4 раза приводит к уменьшению плотности энергии, а значит и радиационного давления в 2 раза. С ростом угла сканирования увеличивается сечение луча (рис. 3), что приводит к ухудшению пространственного силового действия. График, приведенный на рис. 4, позволяет оценить ширину луча, следовательно, размер участка силового действия для различных значений коэффициента фокусировки.

Выводы

Ультразвук высокой интенсивности, генерируемый матрицей излучателей в воздухе, позволяет создавать радиационное давление, вызывающее тактильную стимуляцию.

Величина давления, его пространственная локализация зависят от характеристик дискретных излучателей, геометрии матрицы, выбранного коэффициента фокусировки. Фазовое сканирование по пространству приводит к расширению ультразвукового луча, следовательно, уменьшению радиационного давления.

Полученные в работе результаты могут быть применены при разработке устройств тактильного вещания и устройств дистанционного силового действия для мультимедийных и телекоммуникационных систем.

Список литературы

1. Immersion Corporation: Cyber Touch. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.immersion.com/>.
2. Suzuki Y. Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality / Y. Suzuki, M. Kobayashi // IEEE Computer Graphics and Applications (2005). – Vol. 25(1). – P. 44-47.
3. Iwamoto T. Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound. [Электронный ресурс] / Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, Hiroyuki Shinoda. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.alab.t.u-tokyo.ac.jp/iwa>.
4. Bergman L. Der Ultraschall and seine Anwendung in Wissenschaft und Technik / L. Bergman. – Zurich, 1954. – 858 p.
5. Hoshi T. Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound / T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, H. Shinoda // IEEE Trans. Haptics(2010). – Vol.3(3). – P. 155-165.
6. Hoshi T. Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System / T. Hoshi // IEEE World Haptics (2011). – P. 569-573.
7. Hoshi T. Development of Portable Device of Airborne Ultrasound Tactile Display / T. Hoshi // SICE Annual Conference – August 20-23, 2012, Akita University. – Akita, Japan.
8. Hoshi T. Handwriting Transmission System Using Noncontact Tactile Display / T. Hoshi // IEEE Haptics Symposium. – 2012. – P. 399-401.
9. Fujiwara M. Remote Measurement of Surface Compliance Distribution Using Ultrasound Radiation Pressure / M. Fujiwara, K. Nakatsuma, M. Takahashi, H. Shinoda // IEEE World Haptics. – 2011. – P. 43-47.
10. Ciglar M. An Ultrasound Based Instrument Generating Audible and Tactile Sound / M. Ciglar // NIME – 2010. – P. 19-22.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Кайно Г. Акустические волны: Устройство, визуализация и аналоговая обработка сигналов: пер. с англ. / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990. – 656 с.

Поступила в редколлегию 22.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Лейко, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ТАКТИЛЬНОГО МОВЛЕННЯ

С.О. Козерук, І.В. Котвицький

Сучасні телекомунікаційні системи припускають передачу невербальної інформації з метою більшої ефективності повідомлень. Передача відчуття торкання отримала назву тактильного мовлення. У статті розглянуто особливості генерації матричним випромінювачем повітрі за допомогою фокусованого ультразвуку, що створює силову дію на перешкоди і викликає у людини тактильне відчуття. Наведено приклад розрахунку радіаційного тиску для дискового матричного випромінювача. Досліджено залежність характеристик фокусованого ультразвукового поля і радіаційного тиску від кута просторового сканування.

Ключові слова: матричний випромінювач, ультразвуковий промінь, радіаційне тиск, фазове сканування променем.

USING OF ULTRASOUND FOR TACTILE BROADCASTING FEATURES

S.O. Kozeruk, I.V. Kotvicky

Modern telecommunication systems require the communication of non-verbal information with a goal for more effective communications. Transfer of touch sensations is called tactile broadcasting. First of all, the article describes the features of generation in air using focused ultrasound radiation pressure that creates a force action on an obstacle and causes a person tactile sensation. Moreover, there is an example of calculation of the radiation pressure for disc matrix transmitter in this article. Lastly, the dependence of focused ultrasound field characteristics and radiation pressure on the angle of the spatial scan was investigated.

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