

В.С. АРАКЕЛЯН

МИКРОВОЛНОВЫЙ ИНФРАЗВУКОВОЙ СЕНСОР

Предлагается новый тип инфразвуковых сенсоров с высокой чувствительностью ($\sim 10^7 \text{ Гц/Па}$) и широким динамическим диапазоном ($> 108 \text{ дБ}$) без ограничения по низкой частоте инфразвука на основе микроволнового коаксиального резонатора, нагруженного на емкость. Приведены методика расчета таких сенсоров и результаты статических испытаний изготовленного датчика на частоте $2,5 \text{ ГГц}$. Проведенные испытания показали соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: инфразвук, микроволны, коаксиальный резонатор, сенсор.

Введение. Инфразвуковые волны с частотой от 20 Гц и ниже излучаются в результате любых возмущений атмосферы, распространяются в атмосфере на сотни километров и могут проникать сквозь любые препятствия без существенных потерь. Необходимость разработки высокочувствительных инфразвуковых сенсоров определяется их широким применением в авиации для фиксации и измерения турбулентных потоков, в метеорологии для предсказания шторма и торнадо, в медицине, а также при проведении антитеррористических операций [1-3].

Поэтому разработка высокочувствительного инфразвукового сенсора с широким динамическим диапазоном является актуальной задачей.

В настоящее время для этих целей широко используются пьезоэлектрические сенсоры, микробарометры и микроволновые объемные резонаторы с подвижной стенкой. Каждый из вышеперечисленных сенсоров имеет свои недостатки. Микробарометры и пьезоэлектрические сенсоры имеют высокий уровень собственных шумов, ограничение на низкие ($< 0,1 \text{ Гц}$) инфразвуковые частоты, их параметры зависят от флуктуаций питающего напряжения и электромагнитных наводок. Сенсоры на основе микроволновых резонаторов с подвижной стенкой в широком динамическом диапазоне имеют недостаточную чувствительность [4-6].

Преимуществами высокочастотных емкостных сенсоров, работающих в гигагерцовом диапазоне частот, являются высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, защищенность от любого типа шумов, слабая зависимость от флуктуаций напряжения питания, отсутствие ограничения на нижнюю границу частотного диапазона инфразвука, а также малые размеры и высокая воспроизводимость при массовом изготовлении.

Резонаторный метод основан на размещении колеблющегося объекта в высокочастотном поле микроволнового резонатора, что приводит к изменению его резонансной частоты. Высокая чувствительность в случае применения микроволновых резонаторов достигается работой сенсора на сверхвысоких частотах (СВЧ) с использованием двухканальной схемы измерения с опорным резонатором и измерением разностной частоты [7].

В данной работе для создания высокочувствительных инфразвуковых сенсоров предлагается использовать два СВЧ резонатора коаксиального типа, реализованные в одном корпусе, что позволяет избежать проблем, связанных с термостабилизацией. Один из резонаторов является измерительным, а второй – опорным.

Измерительный резонатор реализован на основе коаксиального резонатора, нагруженного на емкость, образованную центральной частью коаксиала и мембраной. Чувствительным элементом является мембрана, а изменения емкости, образованной центральным проводником коаксиала и мембраной, деформируемой под действием инфразвука, приводят к изменению резонансной частоты микроволнового резонатора.

В работах [8,9] коаксиальный резонатор использовался в качестве dilatометра для измерения сверхмалых ($\sim 10^{-4} \text{Å}$) перемещений, что говорит о высокой чувствительности данного метода измерений.

1. Чувствительность сенсора. Исходя из условия резонанса для коаксиальных резонаторов [10], нагруженных на емкость, с учетом формулы емкости воздушного плоскопараллельного конденсатора и в приближении малого изменения величины $\cot(\omega l/c)$ под действием смещения мембраны [11], вызванного воздействием инфразвука, получим выражение для чувствительности сенсора

$$\frac{\Delta f}{\Delta p} = \frac{\Delta d \cot(\omega l/c)}{d \cdot 2\pi Z C} = \frac{(1-\mu^2)R^4 \cot(\omega l/c)}{16E\delta^3 r^2 \cdot 2\pi^2 Z \epsilon_0}, \quad (1)$$

где l – длина коаксиального резонатора; c – скорость света; Z – волновое сопротивление резонатора; ϵ_0 – электрическая постоянная; r – радиус центральной части коаксиального резонатора; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; R и δ – соответственно радиус и толщина мембраны, m ; Δp – изменение давления, $Па$; Δf – изменение частоты, $Гц$.

Полагая $Z = 75 \text{ Ом}$ и подставляя соответствующие константы для мембраны из бронзы, получим

$$\frac{\Delta f}{\Delta p} \approx 4,34 \cdot 10^{-5} \frac{R^4}{r^2 \delta^3} \cot(\omega l/c). \quad (2)$$

Как видно из (2), чувствительность сенсора прямо пропорциональна $R^4/(r^2\delta^3)$, поэтому выбор величин r и δ определяется необходимой чувствительностью сенсора, а максимальный радиус мембраны $R_{\text{макс}}$ определяется из требования, чтобы ее первая резонансная частота была выше верхней частоты принимаемого инфразвукового сигнала.

2. Динамический диапазон сенсора. Динамический диапазон сенсора зависит от величины упругой деформации мембраны. Допустимое (упругое) перемещение мембраны определяется величиной [11]

$$\Delta d_{\text{макс}} = 0,655 R^3 \sqrt{\frac{\Delta p R}{E \delta}}. \quad (3)$$

В случае необходимости расширения динамического диапазона возможно применение сильфона с пружиной, что обеспечивает линейность зависимости перемещения от давления в более широком диапазоне давлений. В качестве измерителя в этом случае возможно применение цилиндрического конденсатора.

Изменение резонансной частоты в случае применения цилиндрического конденсатора

$$\Delta f = \frac{\Delta l_c \cot(\omega l/c)}{l_c \cdot 2\pi C Z} \quad (4)$$

пропорционально величине $\Delta l_c/l_c$, где l_c – длина цилиндрического конденсатора; $\Delta l_c = -\Delta p S/k$; C – емкость цилиндрического конденсатора; S – площадь поверхности сильфона; k – жесткость пружины.

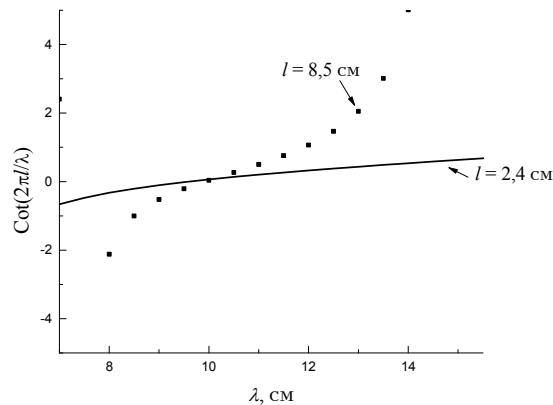


Рис. 1. Зависимость $\cot(2\pi l/\lambda)$ от длины волны для двух значений длин резонатора l

В случае применения сильфонов необходимо учесть то обстоятельство, что резонансная частота под воздействием инфразвука может изменяться в

более широком диапазоне частот. На рис. 1 изображена расчетная зависимость $\cot(2\pi l/\lambda)$ от λ для двух значений длин резонатора $l = 8,5$ см и $l = 2,4$ см.

Как видно из рисунка, в случае использования резонаторов $l = l_0 + \lambda/2$ ($l = 8,5$ см) крутизна, а значит, и чувствительность датчика существенно выше, однако линейность отклика ниже, чем при использовании коротких резонаторов.

3. Выбор длины резонатора. Для резонанса на длине волны λ_0 в отсутствие изменения давления, обусловленного инфразвуком, длина резонатора l_0 равна [12]

$$l_0 = \frac{\lambda_0}{2\pi} \arctan\left(\frac{5,3\lambda_0}{ZC}\right) + \frac{\lambda_0}{2}, \quad (5)$$

где l_0 – длина резонатора, см; λ_0 – длина волны, см; C – емкость, пФ; Z – волновое сопротивление резонатора, Ом.

Как видно из (5), длина резонатора зависит от длины волны λ_0 , емкости C и волнового сопротивления Z . В случае, когда волновое сопротивление $Z = 75$ Ом, длина резонатора для определенной λ_0 зависит только от C . Из (1) видно, что чувствительность датчика тем больше, чем меньше емкость. График зависимости l от C приведен на рис. 2 для трех центральных длин волн: $\lambda_0 = 9,96$ см ($f = 3$ ГГц); $\lambda_0 = 12,2$ см ($f = 2,5$ ГГц), $\lambda_0 = 29,9$ см ($f = 1$ ГГц).

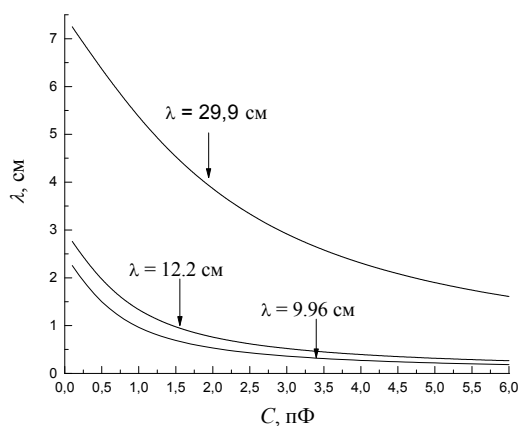


Рис. 2. График зависимости длины СВЧ резонатора от емкости для трех длин волн

Из рис. 2 видно, что чувствительность сенсора (крутизна кривой) растет с уменьшением длины волны (с повышением центральной частоты резонатора), и для получения высокой чувствительности необходимо выбрать длину резонатора, исходя из минимальной емкости. Кроме того, добротность коаксиального резонатора тем выше, чем меньше емкость [10]. Возьмем, для примера, центральную частоту резонатора 2,5 ГГц. Соответствующая длина волны $\lambda_0 = 12,2$ см. На рис. 3 показан график $\cot(\omega l/c)$ в зависимости от длины ре-

зонатора. Как видно из этого рисунка, в диапазоне длин резонатора 1,5...2,7 см зависимость $\cot(\omega l/c)$ от l можно аппроксимировать прямой линией. Очевидно, что для получения высокой чувствительности и максимального динамического диапазона необходимо работать в области длин резонатора 1,5...2,7 см.

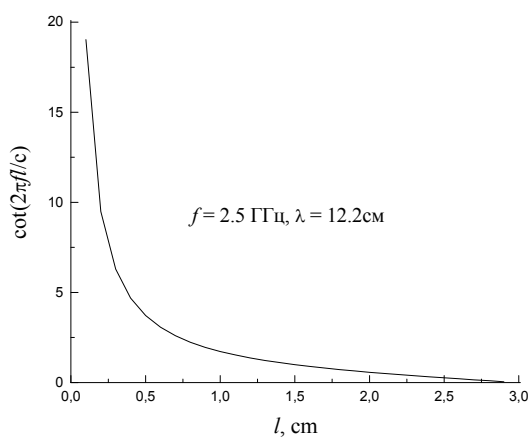


Рис. 3. Зависимость $\cot(\omega l/c)$ от длины резонатора

Проведены статические испытания изготовленных датчиков, состоящих из двух СВЧ коаксиальных резонаторов: опорного и измерительного, объединенных в один корпус и настроенных на резонансную частоту 2,5 ГГц, с длиной резонатора $l = 2,4$ см. Фотография исследованного сенсора приведена на рис. 4.

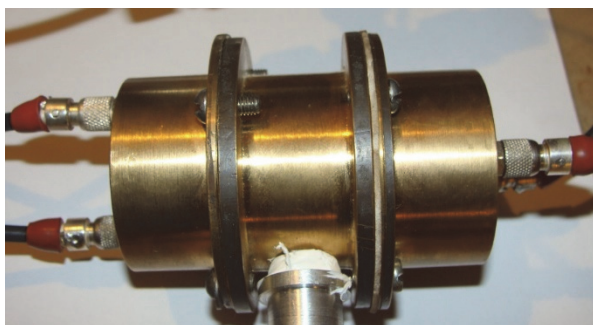


Рис. 4. Фотография исследованного сенсора

На рис. 5 приведен экспериментальный график зависимости смещения резонансной частоты сенсора с длиной резонатора $l = 2,4$ см для мембран из бронзы толщиной $\delta = 40$ мкм и $\delta = 60$ мкм. Как видно из графика, линейность отклика сенсора на изменение давления удовлетворительна, а динамический диапазон превосходит 108 дБ.

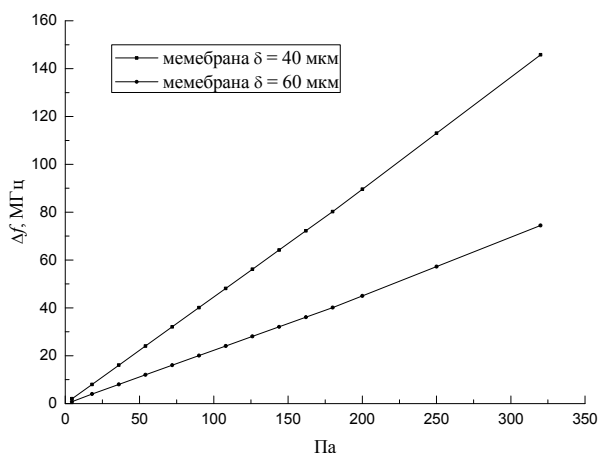


Рис. 5. Зависимость изменения резонансной частоты сенсора от изменения давления

Заключение. Таким образом, предлагается новый тип инфразвуковых сенсоров с высокой чувствительностью ($\sim 10^7$ Гц/Па) и широким динамическим диапазоном (> 108 дБ) без ограничения по низкой частоте инфразвука на основе микроволнового коаксиального резонатора, нагруженного на емкость. Приведена методика расчета таких сенсоров, позволяющая рассчитать и изготовить инфразвуковой сенсор высокой чувствительности с широким динамическим диапазоном. Проведенные статические испытания изготовленных датчиков, состоящих из двух СВЧ коаксиальных резонаторов - опорного и измерительного, объединенных в один корпус и настроенных на резонансную частоту $2,5$ ГГц, показали соответствие расчетных и экспериментальных данных в диапазоне давлений $4,5 \dots 320$ Па, использованных при проведении эксперимента. Их экстраполяция на малые давления порядка 10^{-3} Па дает в соответствии с приведенными выше расчетами смещение частоты $\sim 10^4$ Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NASA Technology Transfer Program. <https://technology.nasa.gov/ratent/LAR-TOPS-106>.
2. Monitoring and recognition of debris flow infrasonic signals / **Dun-long Liu, Xiao-Peng Leng, Fang-Qiang Wei, et al** // Journal of Mountain Science.- China, 2015.-12 (4). - P. 797-815.
3. **Pichon Lr., Blanc A., Hauchecome E.** Infrasound monitoring for atmospheric studies.- London, New York, Springer Dordrecht Heidelberg, 2009.- 731 p.
4. An optical fiber infrasound sensor: A new lower limit on atmospheric pressure noise between 1 and 10 Hz / **Mark A. Zumbege, Jonathan Berger, Michael A.H. Heldin,** et al // The J. Acoust. Soc. Am.- 2003.-113(5).- P. 2474 -2479.
5. **Фрайден Дж.** Современные датчики.- М.: Техносфера, 2005.- 592 с.

6. **Polivka J.** An Overview of Microwave Sensor Technology // High Frequency Electronics.- USA, 2007.- 4. P. 32-42.
7. **Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 708 с.
8. **Whiddington R.** The Ultra-Micrometer // Phil.Mag.- 1920.- 40 (289).- P. 634-639.
9. **Pudalov V.M., Khaikin M.S.** Dilatometr with a sensitivity of 10^{-4} Angstrom // Cryogenics.- 1969.-4.- P. 128-134.
10. **Лебецов И.В.** Техника и приборы сверхвысоких частот.- М., Л.: Гос. Энергетическое изд-во, 1961.- 818 с.
11. **Пономарев С.Д., Андреев Л.Е.** Расчет упругих элементов машин и приборов.- М.: Машиностроение, 1980.- 329 с.
12. **Орлов С.И.** Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов.- М.: Радио, 1970.- 256 с.

Институт физических исследований НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.05.2017.

Վ.Ս. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ

ՄԻԿՐՈՍԱԼԻՔԱՅԻՆ ԻՆՖՐԱՉՍՅՆԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐ

Առաջարկվում է բարձր զգայնությամբ $\sim 10^7$ Հց/Պա և լայն դինամիկական տիրույթով (> 108 դԲ) ինֆրաձայնային սենսորների նոր տեսակ, առանց ինֆրաձայնի ցածր հաճախությամբ սահմանափակման, կոաքսիալ միկրոալիքային ռեզոնատորի հիման վրա՝ բեռնված ունակությամբ: Ներկայացված են նման սենսորների հաշվարկի մեթոդիկան և պատրաստված տվիչի ստատիկական փորձարկումների արդյունքները 2,5 ԳՀց հաճախության դեպքում: Կատարված փորձարկումները ցույց են տվել հաշվարկային և փորձարկական տվյալների համապատասխանությունը:

Առանցքային բառեր. ինֆրաձայն, միկրոալիքներ, կոաքսիալ ռեզոնատոր, սենսոր:

V.S. ARAKELYAN

A MICROWAVE INFRASOUND SENSOR

A new type of infrasound sensors based on coaxial resonator loaded by a capacity with high sensitivity ($\Delta f \approx 10^7$ Hz/Pa) and wide dynamic range (>108 dB) without a low infrasound frequency limit are proposed. The calculation method of such sensors and the results of static tests are introduced. The tests have showed the agreement between the calculated and experimental data.

Keywords: infrasound, microwaves, coaxial resonator, sensor.