

ИНТЕНСИВНОСТЬ СУБГАРМОНИКИ $F_0/2$ В СПЕКТРЕ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА ПРИ КОЛЛЕКТИВНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПУЗЫРЬКОВ В КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ

Курлюк Е.А., Лебедь А.А., Бойдич А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дежгунов Н.В. – к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 5.2

Аннотация. Рассматривается формирование субгармонической компоненты $F_0/2$ в спектре кавитационного шума. На основе численного моделирования акустического сигнала с импульсными возмущениями, соответствующими схлопываниям пузырьков, исследована зависимость амплитуды пика $F_0/2$ в спектре от амплитуды импульса на двойной частоте поля. Показано, что рост интенсивности субгармоники носит нелинейный характер.

Ключевые слова: кавитация, кавитационный шум, спектральный анализ, моделирование

Введение. При развитии кавитации в акустическом поле в жидкости формируется сложный акустический отклик, обозначаемый как кавитационный шум (КШ). Этот сигнал обусловлен суммарным акустическим воздействием кавитационных пузырьков, совершающих радиальные пульсации, перемещающихся в жидкости и испытывающих нестационарное схлопывание. В отличие от регулярного гармонического поля, возбуждающего кавитацию, кавитационный шум носит выраженный нестационарный и статистический характер. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что параметры кавитационного шума чувствительны к состоянию кавитационной области и режимам динамики пузырьков, включая степень синхронности их пульсаций и интенсивность импульсных процессов [1, 2]. Поэтому спектральный анализ кавитационного шума представляет собой эффективный метод исследования кавитации и оценки её активности.

Основная часть. Спектр КШ обычно содержит основную частоту возбуждающего ультразвукового поля, гармонические и субгармонические компоненты, комбинационные частоты и непрерывную составляющую. Их наличие и относительная интенсивность определяются режимом кавитации, концентрацией и размерами пузырьков, а также условиями распространения акустических волн в жидкости [3]. При этом механизмы формирования отдельных спектральных компонент кавитационного шума остаются недостаточно исследованными, что осложняет интерпретацию спектров и использование их параметров для количественной оценки состояния кавитационной области [4].

В настоящей работе рассматривается зависимость субгармонической компоненты спектре кавитационного шума от амплитуды коллективных колебаний кавитационной области. Для анализа используется численное моделирование акустического сигнала, регистрируемого в кавитационной области. Подробное описание алгоритма моделирования и его программной реализации приведено в работах, посвящённых анализу механизмов генерирования спектральных компонент КШ [5-7].

В модели акустический сигнал формируется на основе синусоидального ультразвукового поля с амплитудой давления P_0 , периодом T_0 , соответствующего докавитационному режиму. Воздействие кавитационных пузырьков учитывается введением импульсных возмущений давления с периодом $T_{\text{и}}$, соответствующих моментам их схлопывания. В простейшем случае такие импульсы повторяются с периодом ультразвукового колебания и приводят к появлению в спектре основной частоты F_0 и её гармоник [6]. Для приближения модели к реальным условиям учитываются стохастические отклонения параметров импульсов. В сигнал вводятся случайные смещения их фазового положения и амплитуды, отражающие асинхронность пульсаций пузырьков и статистический разброс условий их коллапса. Ранее показано, что

временная рассинхронизация импульсов приводит к формированию непрерывной составляющей спектра кавитационного шума [6, 7]. В алгоритме также учитываются нелинейные искажения сигнала, влияющие на распределение энергии между спектральными компонентами, включая субгармонику $F_0/2$. Полученный акустический сигнал анализируется в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье, что позволяет определить спектральную структуру кавитационного шума.

В ряде работ интенсивность субгармонической компоненты $F_0/2$ используется как один из параметров оценки состояния кавитационной области. Один из механизмов появления субгармоники в спектре КШ связан с переходом кавитационной системы в режим коллективной динамики пузырьков. В условиях высокой концентрации пузырьков кавитационная область реагирует на акустическое воздействие как единая система, формируя периодическую перестройку акустического сигнала. При этом схлопывания отдельных пузырьков остаются частично рассинхронизированными из-за разброса их радиусов и условий коллапса. Импульсы, создаваемые пузырьками, накладываются с временными и амплитудными отклонениями, что приводит к частичному размыванию дискретной структуры спектра и формированию непрерывной составляющей кавитационного шума.

Для моделирования данного режима дополнительно в сигнал вводились стохастические отклонения параметров импульсов. Амплитуда каждого импульса случайным образом изменялась в пределах $\Delta P = \pm 0,2P_0$, где указанная величина задаёт максимально возможное отклонение от среднего значения. Момент возникновения импульса также случайно смещался относительно его среднего положения в пределах $\Delta t = \pm 0,05T_{\text{и}}$, где $T_{\text{и}}$ – период ультразвукового сигнала. Таким образом, время появления каждого импульса варьировалось в заданном интервале вокруг соответствующей фазы ультразвукового периода, что моделирует асинхронность схлопывания пузырьков. На рисунке 1а, 1б представлены соответствующие спектры сигнала. Коллективная периодичность сохраняется в виде дискретных компонент спектра, однако временная рассинхронизация импульсов приводит к усилению непрерывной составляющей. При добавлении розового шума (рисунок 1б) возрастает мощность низкочастотной части непрерывной составляющей и усиливается широкополосный фон, что соответствует экспериментально наблюдаемому перераспределению спектральной мощности при развитой стохастичности кавитационного процесса [8].

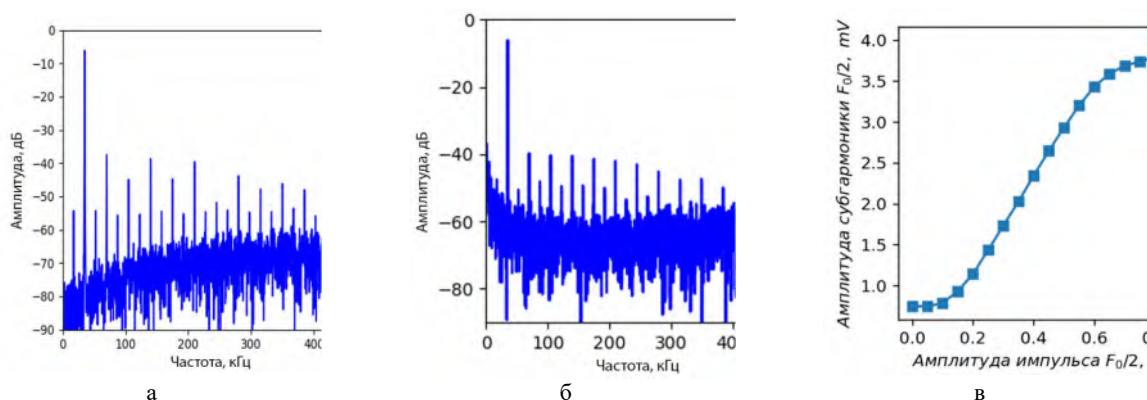


Рисунок 1 – Спектр сигнала при коллективном колебании кавитационной области: а – без добавления розового шума; б – с добавлением розового шума; в – зависимость мощности субгармоники $F_0/2$ от амплитуды сигнала с периодом $2T_0$ с учётом искажений.

На рисунке 1в представлена зависимость мощности субгармонической компоненты $F_0/2$ от амплитуды сигнала с периодом $2T_0$. Значение мощности определялось как максимум спектральной плотности в полосе частот $F_0/2 \pm 2,5$ кГц. Из графика видно, что при увеличении амплитуды двухпериодной составляющей интенсивность линии $F_0/2$ возрастает, однако рост носит выраженный нелинейный характер. В модели учитывается влияние временных смещений импульсов, амплитудных флуктуаций и вероятностных пропусков отдельных импульсов. Эти факторы приводят к частичному нарушению регулярности

двухпериодной структуры сигнала, уширению спектральной линии $F_0/2$ и перераспределению части энергии в непрерывную составляющую спектра. Дополнительный вклад в изменение формы зависимости вносят нелинейные искажения акустического тракта, вызывающие перераспределение энергии между спектральными компонентами. В результате увеличение амплитуды двухпериодной составляющей сопровождается монотонным, но существенно нелинейным ростом пиковой мощности субгармонической компоненты $F_0/2$.

Заключение. Проведённое моделирование показывает, что появление и рост субгармонической компоненты $F_0/2$ в спектре кавитационного шума связано с формированием двухпериодной структуры акустического сигнала при коллективной динамике кавитационной области. Установлено, что увеличение амплитуды соответствующей составляющей приводит к росту пиковой мощности линии $F_0/2$, однако зависимость имеет нелинейный характер. Это обусловлено влиянием фазовых и амплитудных флуктуаций импульсов, вероятностных пропусков импульсных событий и нелинейных искажений сигнала, вызывающих частичное уширение линии $F_0/2$ и перераспределение энергии в непрерывную составляющую спектра. Полученные результаты показывают, что при интерпретации интенсивности субгармонической компоненты необходимо учитывать влияние стохастических факторов и искажений акустического сигнала.

Список литературы

1. Evaluation of correlation between chemical dosimetry and subharmonic spectrum analysis to examine the acoustic cavitation / H. Hasanzadeh [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17. – P. 863–86.
2. Kwon, O. Simultaneous measurements of acoustic emission and sonochemical luminescence for monitoring ultrasonic cavitation / O. Kwon // *The Journal of the Acoustical Society of America* – 2021. – P. 4477–4483. *Sonochemistry*, 40 (1), 104 (2018). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.
3. Дежкунов, Н. В. Анализ механизма генерирования непрерывной составляющей кавитационного шума / Н. В. Дежкунов, В. С. Минчук, С. В. Уваров, Е. А. Курлюк // *Письма в журнал технической физики*. – 2024. – Т. 50, вып. 6. – С. 7–10.
4. Pengfei, W. Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review / W. Pengfei // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2022. – Vol. 70. – P. 10.
5. Курлюк, Е. А. Моделирование однопузырьковой кавитации / Е. А. Курлюк, И. Е. Олещук, А. Ю. Перхунова, (науч. рук. Н. В. Дежкунов) // *Материалы 61-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Электронные системы и технологии»*, Минск, 21–25 апр. 2025 г. – Минск : БГУИР, 2025. – С. 362–365. – ISBN 978-985-543-817-6.
6. Курлюк, Е. А. Анализ механизма генерирования спектральных составляющих кавитационного шума / Е. А. Курлюк, И. Е. Олещук ; науч. рук. Н. В. Дежкунов, Ю. И. Савилова // *Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2024»* / редкол.: А. Г. Баханович [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2025. – С. 114–116. – 539 с. – ISBN 978-985-553-825-8.
7. Курлюк, Е. А. Механизмы генерирования спектральных компонент кавитационного шума / Е. А. Курлюк, А. Ю. Перхунова, В. С. Минчук, Н. В. Дежкунов // *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2025): материалы XX юбилейной Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Бийск, 22–24 окт. 2025 г. / под ред. оргкомитета конф. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2025. – С. 115–116.*
8. Котухов, А. В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов, В. С. Гаврилюк, В. С. Минчук, Н. В. Дежкунов // *Доклады БГУИР*. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 80–88.

UDC 534.8

INTENSITY OF THE $F_0/2$ SUBHARMONIC IN THE CAVITATION NOISE SPECTRUM DURING COLLECTIVE OSCILLATIONS OF BUBBLES IN THE CAVITATION REGION

Kurliuk E.A., Lebed A.A., Boidzich A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dezhkunov N.V. – Cand. of Sci., associate professor, Head of the Research Laboratory 5.2

Annotation. The formation of the subharmonic component $F_0/2$ in the cavitation noise spectrum is examined. Using numerical simulation of an acoustic signal with pulsed disturbances corresponding to bubble collapses, the dependence of the $F_0/2$ peak amplitude in the spectrum on the pulse amplitude at double the field frequency is investigated. It is shown that the increase in the subharmonic intensity is nonlinear.

Keywords: cavitation, cavitation noise, spectrum analysis, modeling