

УДК 534.231

В.С. Дідковський, д-р техн. наук, В.С. Єфремов, В.П. Заєць, С.А. Луньова, канд. фіз.-мат. наук

Експериментальне дослідження звукового поля двох тональних джерел з близькими частотами

Проведены исследования акустического поля, которое было создано двумя направленными источниками гармонических колебаний с незначительной рассогласованностью по частоте. Рассчитано зону максимального давления двух излучателей с параллельными осями.

Researches of an acoustic field created by two directed sources of harmonious fluctuations with insignificant mismatch of frequency are carried out. A zone of the maximal pressure of two radiators with parallel axes was calculated.

Вступ

Для створення рівномірного звукового поля з достатнім рівнем звуку, особливо в значному за розмірами просторі, звичайно використовують декілька звукових джерел. При цьому в результаті суперпозиції звукових хвиль утворюється складне звукове поле, загальна структура якого залежить від співвідношення амплітуд, частот і фаз складових сигналів [1,2]. В разі когерентних джерел у спільному полі формується стійка інтерференційна картина, яка розмивається при порушенні когерентності, тобто виникненні розбалансування частот, фаз і напрямків сигналів, внаслідок чого різниця фаз між ними швидко і безпорядно змінюється.

Особливий вигляд результуючих коливань, так звані биття, утворюються при суперпозиції двох гармонічних коливань з близькими частотами. Якщо різниця між частотами не перевищує 15 Гц, то сумарне коливання сприймається на слух як єдиний сигнал з частотою, що дорівнює середньому значенню двох

частот $\omega_0 = \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2}$ і зміною амплітуди з часом

тотою $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ (ω_1 і ω_2 - частоти вихідних сигналів), тобто маємо особливий випадок амплітудної модуляції.

Таким чином, при випроміненні джерелами тональних сигналів з близькими частотами зміни звукового тиску у часі в певній точці поля можна записати у вигляді

$$P(t) = A_1 [1 + M \cdot \sin(\Omega \cdot t + \Psi)] \cdot \sin(\omega_0 + \varphi_0),$$

де A_1 – амплітуда першого вихідного сигналу;

M – коефіцієнт модуляції, який дорівнює

відношенню $M = \frac{A_2}{A_1}$ (A_2 – амплітуда другого

вихідного сигналу); Ψ і φ_0 – відповідно фази огинаючої і основного сигналу.

На практиці може мати місце невимусене незначне розбалансування частот сигналів, відтворюваних гучномовцями, в результаті чого слухач відчуватиме періодичні зміни гучності сигналу з дуже низькою частотою Ω . Вплив таких низькочастотних коливань при їх певній інтенсивності може викликати зміну психологічного стану людини від розслаблення до активної бадьорості в залежності від частоти. В зв'язку з цим виникає потреба оцінити глибину модуляції, що виникає в звуковому полі двох джерел. Це дозволить визначити амплітуду низькочастотної складової результуючого сигналу і передбачити ступінь впливу її на слухача. Як показано в роботі [3], модуляційні зміни сигналу відбуваються по всьому полю, а не тільки в напрямках, куди складові сигнали надходять з різними фазами. При цьому максимальна глибина модуляції ($M = 1$) спостерігається, коли додаються сигнали з однаковими амплітудами (на рівних відстанях від джерел).

В роботі [3] методом координат було розраховане звукове поле двох направлених тональних джерел звуку і за допомогою порівняння з полем одного джерела оцінювалася зона максимального звукового тиску, в якій при розбалансуванні частот модуляції спотворення результуючого сигналу очікувалося найбільшим. Виявилось, що ця зона займає більшу частину озвучуваної площадки, і конфігурація її залежить від взаємного розташування джерел і їх характеристики направленості. Експеримент, який підтверджував результати розрахунків, виконувався у заглушеній камері розміром 5,0х3,5х5,0 м³. Обмеженість розмірів камери дозволила виконати виміри тільки в центральній частині звукового поля двох ідентичних джерел з паралельними акустичними осями, розташованих на відстані 2 м одне від одного.

Результати вимірів звукових сигналів

Більш детально оцінити картину модуляційних змін сигналу в звуковому полі вдалося можливим в результаті виконання експериментальних досліджень на площі розміром 20х20 м² у відкритому просторі.

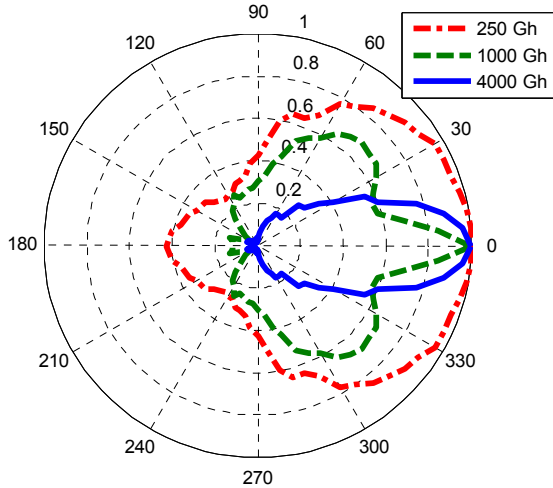


Рис. 1. Характеристика направленості випромінювачів звуку UNITRA TONSIL у горизонтальній площині на частотах: 250 Гц; 1000 Гц; 4000 Гц

В ході експерименту проводились виміри звукового тиску, утвореного двома ідентичними випромінювачами UNITRA TONSIL, розташованими на відстані 10 м один від одного. Попередньо виміряна згідно з [4], характеристика направленості гучномовців наведена на рис. 1.

Для прийому акустичного сигналу використовувався ненаправлений конденсаторний мікрофон Behringer ECH 8000, частотна характеристика якого подана на рис. 2.

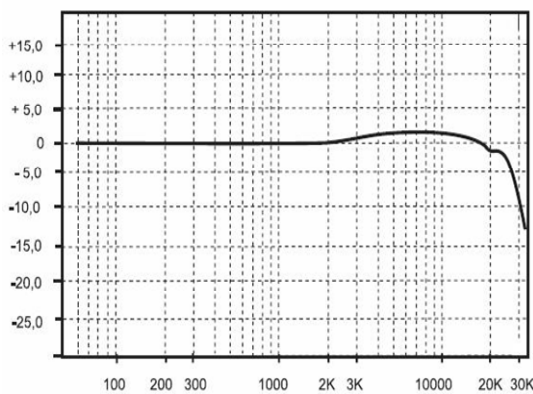


Рис. 2. Частотна характеристика мікрофону Behringer ECH 8000 (по вертикалі – нерівномірність в дБ, по горизонталі – Гц)

В якості еталона частоти використана звукова карта M-Audio Fast Pro Track ПЕОМ. Вимірювання виконувалися на частотах 250, 1000 і 4000 Гц, вибраних зі стандартного ряду частот [5]. В процесі вимірювання робочі частоти мали розбалансування 4 і 10 Гц.

Схема розміщення гучномовців і взаємного розташування точок простору, в яких вимірювався звуковий тиск (на висоті акустичних осей гучномовців, направлених паралельно одна одній в горизонтальній площині), показана на рис. 3. Вимірювання виконувались в точках 1-12 з кроком 5 м.

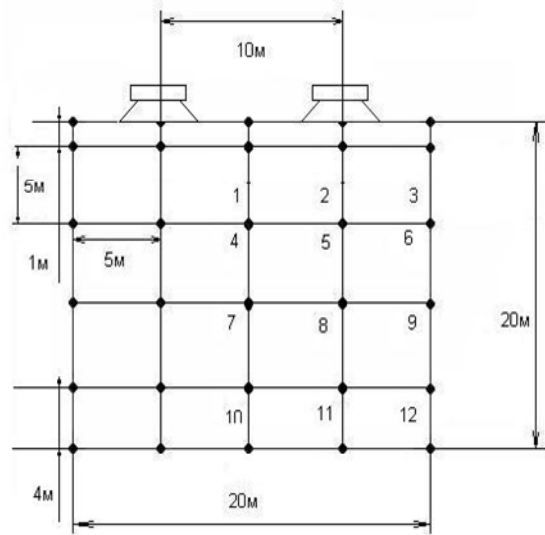


Рис. 3. Схема розміщення гучномовців і точок вимірювання звукового тиску

В місцях поля на частотах вимірів із заданим розбалансуванням спостерігалися чітко виражені биття. Частота пульсацій огинаючої дорівнювала різниці робочих частот тональних синфазних випромінювачів (рис. 4).

Як видно з форм сигналів, наведених на рис. 4, ефект биття спостерігається по всьому полю, як на центральній осі між гучномовцями (рис. 4а,б), так і у віддалених точках поля на бічних границях площадки (рис. 4в). Амплітудна модуляція сигналів добре відчувалася на слух періодичною зміною гучності звуку. Більш інтенсивними коливання гучності видавалися при розбалансуванні частот сигналів на 4 Гц, що підтверджує особливості слухового сприйняття модульованих сигналів [2].

Обробка експериментальних результатів

За допомогою пакета MatLab виконана обробка експериментально одержаних результатів. Для кожного з виміряних сигналів виконувалось виділення огинаючої сигналу і обчислення коефіцієнта модуляції.

Оскільки максимальне значення амплітуди огинаючої сигналу дорівнює сумі амплітуд сигналів A_1 і A_2 , а мінімальне значення – їх різниці, то коефіцієнт модуляції обраховувався як відношення

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}$$

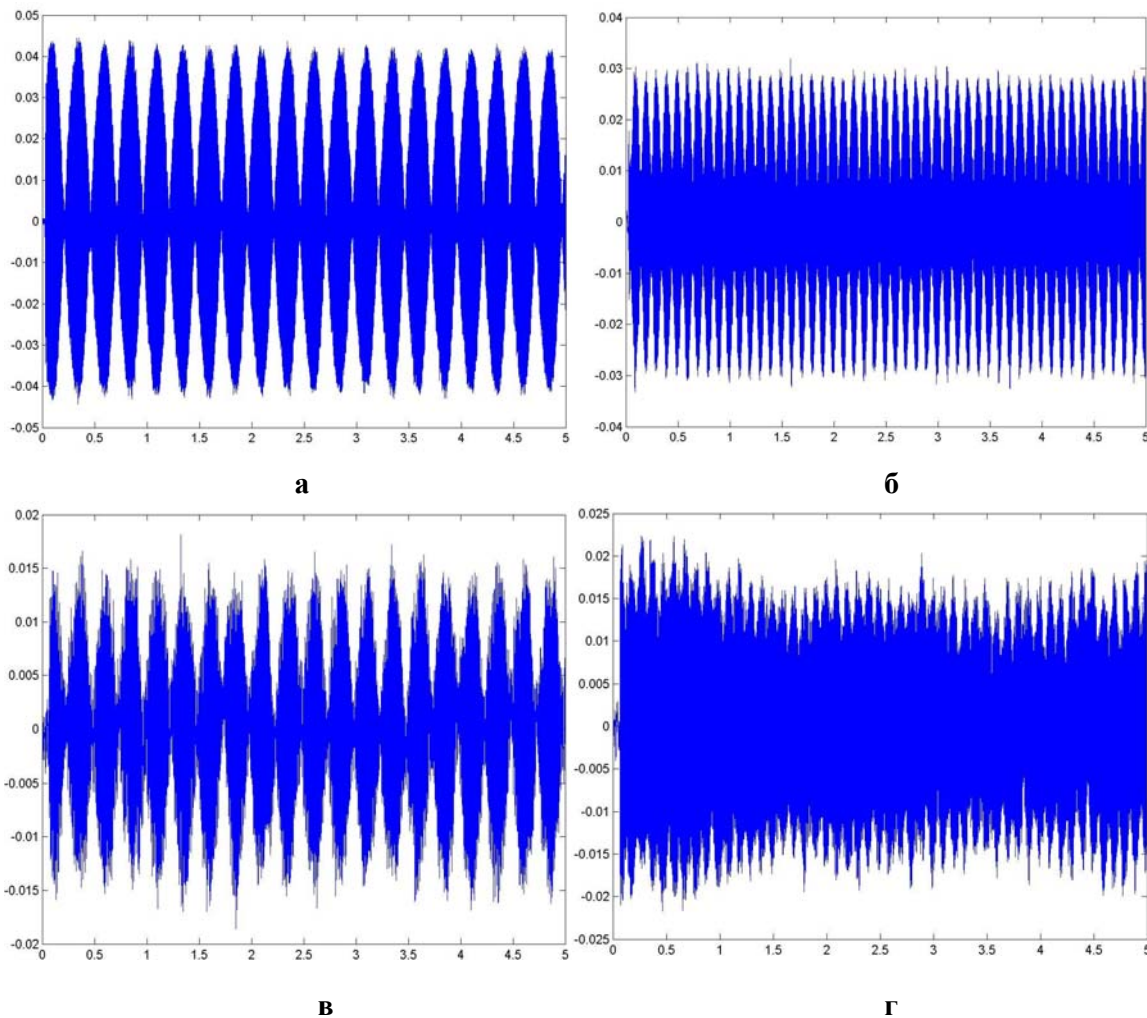


Рис. 4. Експериментально одержані сумарні звукові сигнали: в точці 4 – частоти випромінювачів 250 і 254 Гц (а) та 4000 та 4010 Гц (б); в точці 12 – частоти випромінювачів 250 і 254 Гц (в) та 4000 та 4010 Гц (г); по вертикалі – амплітуда сигналу, В; по горизонталі – час, с

де A_{\max} і A_{\min} - відповідно, максимальне і мінімальне значення амплітуди огинаючої результуючого сигналу.

Розподіл значень глибини модуляції M по площі озвучуваної площадки на частотах 250 і 4000 Гц із заданим розбалансуванням наведений на рис. 5 (окреслена зона з глибиною модуляції $M \geq 0,5$).

Незалежно від частоти сигналів спільним у вигляді конфігурації зони найбільшої глибини модуляції є те, що вона охоплює центральну частоту озвучуваної площадки і область між випромінювачами.

На високих частотах (рис.5,в), а також при збільшенні різниці між частотами сигналів (рис.5,б) розміри відповідної зони зменшуються. Мінімальна глибина модуляції становил $M=0,1$ в точці 10 на частотах 1000 і 1004 Гц.

Такі амплітудні зміни сигналу виявляються достатньо помітними на слух [1, 2].

Максимальна глибина модуляції досягала значення $M=0,86$ в точці 7 на частотах 250 і 254Гц.

Загалом, виявилася тенденція до зменшення глибини модуляції зі зростанням основної частоти сигналу.

Для порівняння експериментально одержаних результатів з розрахунковими, наведемо конфігурацію зони найбільшої глибини модуляції, одержаної в роботі [3], як зони максимального звукового тиску для сигналів з частотами 250 і 254 Гц (рис. 6).

Щодо порівняння результатів вимірів, проведених в даній роботі на відкритому просторі і в заглушеній камері [3], то вони майже співпадають на площі між випромінювачами, тобто в тій частині поля, де можливо було провести виміри в результаті обмеженості розмірів камери.

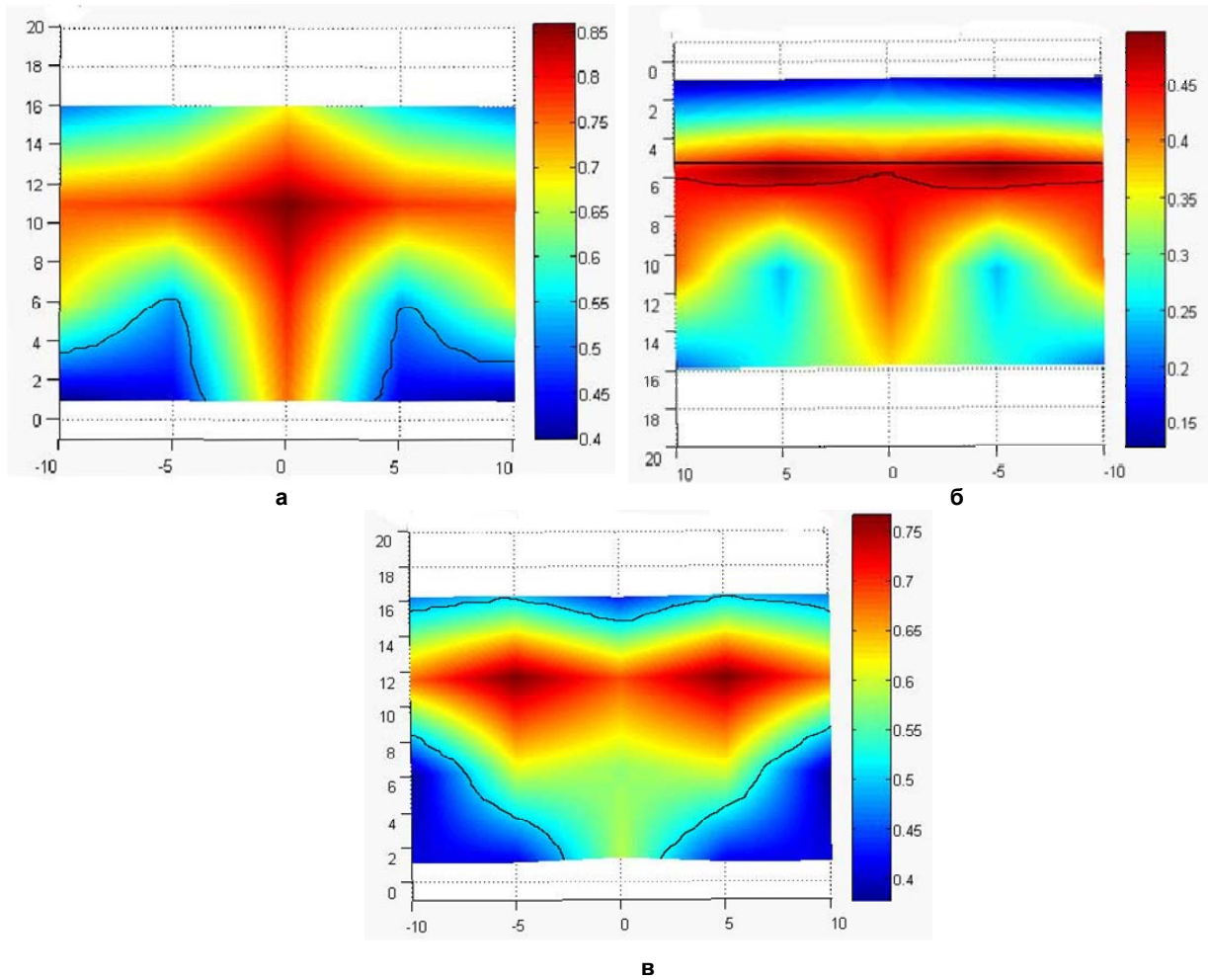


Рис. 5. Розподіл значень глибини модуляції двох сигналів з частотами: (а) – 250 і 254 Гц; (б) – 250 і 260 Гц; (в) – 4000 і 4010 Гц; по вертикалі і горизонталі – розміри озвучуваної площадки, м

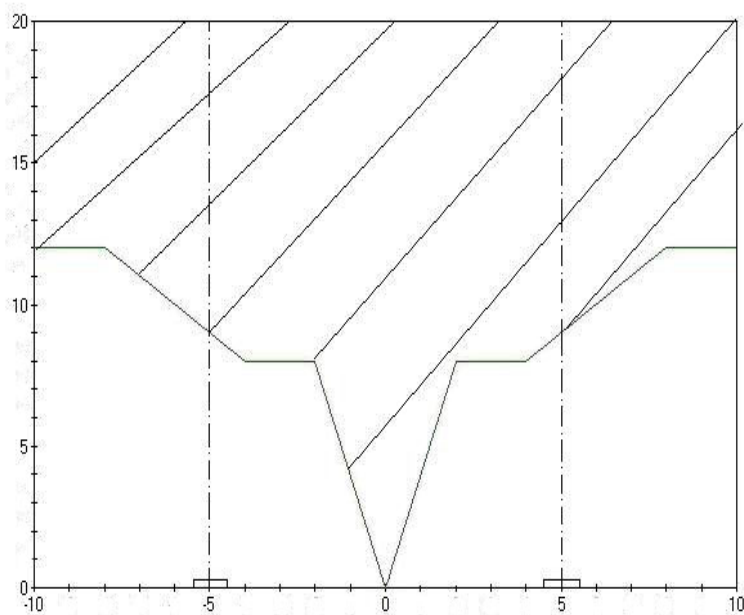


Рис.6. Розрахована зона максимального звукового тиску (заштрихована область) двох випромінювачів з паралельними акустичними осями (1,2): по горизонталі і вертикалі – розміри озвучуваної площадки, м

Висновки

При озвучуванні відкритих площадок великих розмірів тональними звуковими джерелами з розбалансованими частотами, по всьому полю спостерігається ефект биття, який виражається в амплітудній модуляції результуючого сигналу і добре відчувається на слух. Періодична зміна гучності сигналу відбувається з різницевою частотою основних сигналів.

В ході експерименту значення глибини модуляції результуючого сигналу змінювались в межах 0,1...0,86 в залежності від місця виміру.

За результатами обробки вимірних даних одержані картини розподілу глибини модуляції по площі озвучування і визначені конфігурації зони найбільшої глибини модуляції ($M \geq 0,5$) в залежності від частот сигналів.

В разі двох джерел з паралельними акустичними осями, розташованих вздовж однієї сторони площадки, зона максимальної модуляції охоплює центральну частину площадки між випромінювачами і майже всю площадку у віддаленій зоні.

Факт утворення амплітудно-модульованих сигналів, причому в більшій частині поля зі значною глибиною модуляції, при одночасній роботі двох і більше тональних джерел звуку з розбалансованими частотами слід обов'язково враховувати при озвученні великих за розмірами відкритих площадок.

Література

1. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної і фізіологічної акустики. – К.: Постприм, 2001. – 422с.
2. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. – С.-П.: Композитор, 2006. – 780 с.
3. Дидковский В.С., Завертайло В.Ю., Лунева С.А. Метод определения зоны максимального звукового давления двух излучателей// Электроника и связь. - №1 (48). – 2009. – с. 38-44.
4. Громкоговорители. Методы измерения электроакустических параметров / ГОСТ 16122 – 87. – М.: Стандарты, 1987. – 120с.
5. Частоты акустических измерений / ГОСТ 12090 – 80. – М.: Стандарты, 1980. – 57с.