УДК 004.056.5:534.8

Машура Андрій Павлович,

студент 4 курсу, група ІРТ-23-1 Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Олейніков Анатолій Миколайович,

к.т.н., професор, кафедра інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації Харківського національного університету радіоелектроніки

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКУСТИЧНИХ ТА УЛЬТРАЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ МОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Розглянуто фізичні принципи захисту мовної інформації від несанкціонованого запису та запропоновано критерії зіставлення акустичних і ультразвукових методів маскування. На основі чисельної моделі мікрофонного тракту із квадратичною нелінійністю досліджено зміну відношення сигнал/шум на вплив широкосмугової акустичної завади та двох ультразвукових тонів. Для обраних нормованих параметрів акустичне маскування знизило SNR приблизно на 20 дБ; порівняння зниження від ультразвуку отримано лише за достатньої нелінійності приймального тракту. Показано, що ефективність ультразвукової протидії залежить від

конструкції мікрофона, а енергетичне погіршення запису не є безпосереднім доказом втрати розбірливості.

Ключові слова: мовна інформація, акустичне маскування, ультразвук, мікрофон, нелінійність, сигнал/шум.

Актуальність, мета та постановка задачі. Збереження конфіденційності усних переговорів ускладнюється наявністю компактних засобів звукозапису та застосуванням вузькоспрямованих мікрофонів. Підвищення просторової вибірковості приймача може поліпшувати виділення мови з фонового шуму [1]. Тому наявність завадового випромінювання сама по собі не характеризує рівень захищеності: необхідно оцінювати сигнал після його проходження через конкретний приймальний тракт.

Мета роботи – порівняти ефективність акустичного та двочастотного ультразвукового маскування за єдиним енергетичним критерієм і визначити обмеження застосування такого порівняння. Для цього поставлено завдання класифікувати методи захисту за фізичним механізмом, обрати критерії ефективності, побудувати модель «мова — завада — мікрофон», дослідити залежність вихідного відношення сигнал/шум від характеристик приймача та сформулювати висновки для практичної перевірки.

Фізичні основи методів захисту. Пасивні методи спрямовані на послаблення небезпечного сигналу через звукоізоляцію, герметизацію огороджувальних конструкцій, акустичне поглинання та віброізоляцію. Активне акустичне маскування, навпаки, підвищує рівень завади в інформативній частотній смузі мови; використовують широкосмуговий, мовоподібний та адаптивно сформований шум. Для структурного каналу витоку застосовують віброакустичні завади. Організаційні обмеження доступу й технічний пошук закладних пристроїв доповнюють фізичні способи захисту, але не замінюють їх.

Ультразвукові методи використовують особливості первинного електроакустичного перетворення. Потужний одночастотний сигнал може перевантажувати вхідний каскад або змінювати режим автоматичного регулювання підсилення. Для двох ультразвукових коливань із частотами f_1 і f_2 у нелінійному тракті виникає різницева складова $|f_2 - f_1|$, що може потрапити до смуги запису [2, 3]. Цей ефект не є універсальним: його величину визначають чутливість на ультразвукових частотах, попередня фільтрація та нелінійність мікрофона. За іншим фізичним механізмом модульований ультразвук може генерувати вторинний звук у повітрі. Отже, методи не можна вважати повністю нечутними для людини за будь-яких режимів.

Критерій ефективності та модель. За основний критерій прийнято відношення потужності корисного мовлення P_s до потужності завади P_n на виході записувального тракту в смузі аналізу, виражене в децибелах:

$$SNR = 10 \lg(P_s / P_n), \text{ дБ}. \quad (1)$$

Ефект захисту характеризували зменшенням $\Delta SNR = SNR_0 - SNR_з$, де SNR_0 та $SNR_з$ – значення до й після введення захисної завади. Додатковими критеріями визначено спектральну рівномірність маскування, вплив на спілкування, стійкість до фільтрації та просторової зміни положення приймача. Розбірливість мови доцільно оцінювати окремо, зокрема за результатами розпізнавання тестових фраз або методами, що враховують обмеження індексу STI [4].

У Python змодельовано мікрофонний тракт $y(t) = BPF\{x(t) + \beta x^2(t)\}$, де $x(t)$ – сума мовного сигналу, фонового шуму й захисної завади, β – безрозмірний параметр квадратичної нелінійності, а BPF – смуговий фільтр 300–3400 Гц. Частота дискретизації дорівнювала 192 кГц, тривалість реалізації – 2 с. Мовоподібний тестовий сигнал мав середньоквадратичне значення (СКЗ) 0,10 умовної одиниці, фоновий шум – 0,01. У першому

досліді застосовано акустичний шум із СКЗ 0,10 в мовної смузі; у другому – два ультразвукові тони 40 і 42 кГц з амплітудою A кожен.

У квадратичному члені моделі добуток тонів утворює компоненту 2 кГц, амплітуда якої пропорційна βA^2. Зміна β від 0 до 0,20 дає змогу порівняти близький до лінійного та нелінійний режими. Умовні амплітуди варіантів не відповідають однаковому акустичному рівню SPL або однаковим енергетичним витратам випромінювачів; порівняння стосується поведінки вихідного SNR, а не паспортної ефективності обладнання.

Результати чисельного моделювання. Без спеціального маскування розраховане SNR становило 20,1 дБ. Широкосмуговий акустичний шум знизив його приблизно до 0,03–0,05 дБ незалежно від вибраного значення β. Для ультразвукових тонів за A = 0,8 одержано 20,1 дБ при β = 0; 11,89 дБ при β = 0,05; 6,42 дБ при β = 0,10 та 0,55 дБ при β = 0,20. Отже, без нелінійного перетворення в обраній моделі ультразвукова завада практично не погіршує енергетичний показник запису.

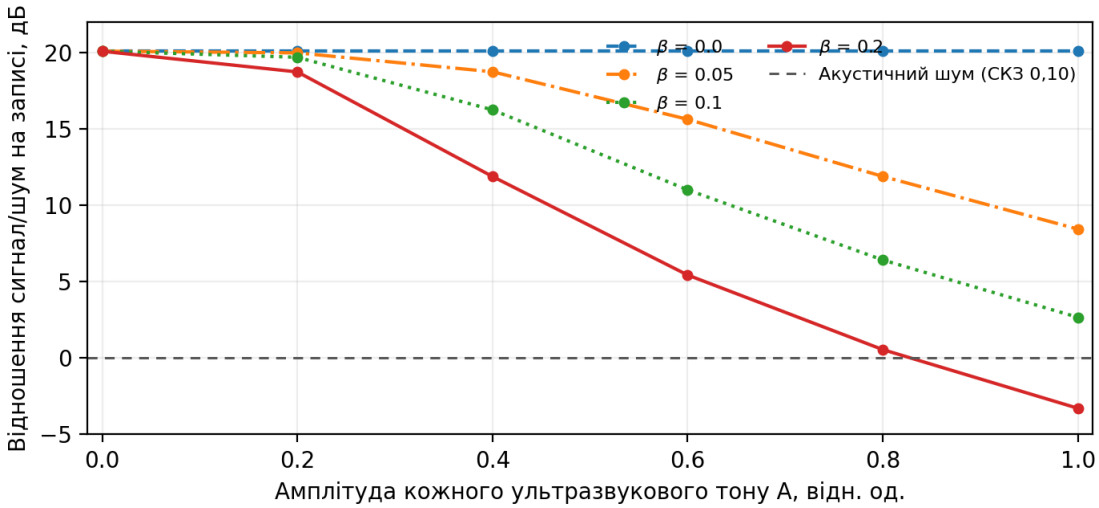

Рисунок 1 – Залежність вихідного SNR від амплітуди ультразвукових тонів за різних коефіцієнтів нелінійності β

За β = 0,20 і A = 0,8 дворазове зменшення амплітуди ультразвукових тонів

перед нелінійним каскадом підвищило SNR із 0,55 до 11,89 дБ. Це підтверджує високу чутливість результату до ослаблення ультразвуку та властивостей мікрофона. Водночас одна сильна різницева складова на частоті 2 кГц не маскує мовлення рівномірно: навіть мале інтегральне SNR не доводить втрату розбірливості після цифрової обробки запису.

Висновки. Акустичне шумове маскування у розглянутій моделі забезпечує передбачуване зниження відношення сигнал/шум, однак може заважати учасникам переговорів. Двочастотний ультразвуковий метод потенційно зменшує чутне навантаження, але його ефективність залежить від нелінійності, передавання ультразвуку до чутливого елемента та фільтрації у конкретному пристрої. Отримані результати є чисельними, а не експериментальними: вони не визначають відсотка нерозбірливих слів і не підтверджують гарантованої протидії запису. Наступним етапом має стати перевірка для реальних мікрофонів, мовних фраз і різних просторових положень із контролем акустичної безпеки.

Список використаних джерел

1. Машура А. П. Виявлення потенційних можливостей вузькоспрямованих мікрофонів. Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали форуму. Харків: ХНУРЕ, 2026. Т. 3. С. 379–381.
2. Roy N., Hassanieh H., Roy Choudhury R. BackDoor: Making Microphones Hear Inaudible Sounds. MobiSys 2017: Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. 2017. P. 2–14. DOI: 10.1145/3081333.3081366.
3. Han Z., Ma J., Xu C., Zhang G. UltraJam: Ultrasonic Adaptive Jammer Based on Nonlinearity Effect of Microphone Circuits. High-Confidence Computing. 2023. Vol. 3, No. 3. Art. 100129. DOI: 10.1016/j.hcc.2023.100129.
4. IEC 60268-16:2020. Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Geneva: IEC, 2020.