

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАСКИРОВАНИЯ РЕЧИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ В ЦЕЛЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ УТЕЧКАМ АУДИОИНФОРМАЦИИ

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MULTI-CHANNEL SPATIAL MASKING OF SPEECH IN ENCLOSED SPACES IN ORDER TO COUNTERACT LEAKS OF AUDIO INFORMATION

**J. Madida
V. Ivanov
I. Krepak**

Summary. This scientific paper analyses the spatial effectiveness of multi-channel speech masking in enclosed spaces. A typical conference room measuring $6 \times 4 \times 3$ m was used for modelling, with four masking noise sources located near the corners and a speech source located in the centre of the room. Based on a simplified model of acoustic propagation, the distribution of sound pressure levels (SPL) and local signal-to-noise ratios (SNR) was calculated. The SPL and SNR maps constructed allowed for the classification of speech privacy zones.

The scientific paper examines in detail the dependence of the degree of masking effectiveness on the parameters of sound sources. Several approaches are proposed for optimising the space used and modelling sound sources in different positions to improve the overall effectiveness of acoustic speech protection.

Keywords: multichannel masking, «SPL»-distribution, «SNR», speech privacy, room acoustic modeling.

Мадида Джуссе Шарлен

аспирант, Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
Charlenemadida@gmail.com

Иванов Владимир Алексеевич

доктор военных наук, Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
ivanov@fa.ru

Крепак Иван Павлович

аспирант, Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации;
Руководитель группы информационной безопасности,
ООО «Клиника Будь Здоров» г. Москва
arafoxnis@gmail.com

Аннотация. В данной научной работе выполнен анализ пространственной эффективности многоканального маскирования речи в замкнутых помещениях. Для моделирования использован типовой конференц-зал размерами $6 \times 4 \times 3$ м с четырьмя источниками маскирующего шума, расположенными вблизи углов и речевым источником, размещённым в центре помещения. На основе упрощённой модели акустического распространения рассчитано распределение уровней звукового давления (показатель «SPL») и локального отношения сигнал/шум («SNR»). Построенные SPL- и SNR-карты позволили провести классификацию речевой приватности зон.

В работе детально рассмотрена зависимость степени эффективности маскирования от параметров источников звука. Предложены несколько подходов по оптимизации используемого пространства и моделированию источников звука в различных положениях для повышения общей эффективности акустической защиты речи.

Ключевые слова: многоканальное маскирование, «SPL»-распределение, «SNR», приватность речи, моделирование помещений.

Введение

Современные системы защиты информации уделяют значительное внимание акустическим каналам утечки конфиденциальных данных. Одним из наиболее уязвимых элементов таких систем остаётся речевая информация, передаваемая в закрытых помещениях — конференц-залах, переговорных комнатах, лабораториях и инженерных центрах управления [1] [3]. Даже при отсутствии прямого доступа к звуковым записям, акустические сигналы могут быть перехвачены с помощью чувствительных микрофонов, лазерных и виброакустических датчиков.

На данный момент, основной эффективный метод противодействия несанкционированному прослушиванию является акустическое маскирование речи [2]. Оно подразумевает создание активного искусственного шумового фона, снижающего разборчивость речевого сигнала за пределами защищаемой зоны.

Наиболее перспективным направлением сейчас является многоканальное (пространственное) маскирование, при котором шумовые источники размещаются в различных точках помещения с целью формирования равномерного звукового поля [4] [5]. Такой подход позволяет минимизировать участки с низким уровнем

маскирующего сигнала, где речь остаётся частично различимой.

Несмотря на активное развитие такого подхода, ещё не до конца изучены вопросы оценки эффективности пространственного распределения шума и влияния геометрии помещения на уровни маскирования. Цели данной работы — провести моделирование многоканальной модели маскирования речи в типовой переговорной комнате, оценить пространственное распределение уровней звукового давления («SPL») и отношения сигнала к шуму («SNR»), определяющих степень акустической приватности.

Методика исследования

Для анализа эффективности пространственного маскирования речи была разработана модель акустического поля в замкнутом помещении. В качестве исследуемого объекта рассматривался типовой конференц-зал размером 6 × 4 × 3 м, соответствующий условиям реальных переговорных помещений, где обычно проводится передача конфиденциальной информации.

В центральной части помещения располагался источник речи, моделирующий активного спикера. Четыре источника маскирующего шума были определены вблизи углов помещения, на высоте 1.5 м от пола. Это соответствует высоте, на котором находится голова человека. Такое расположение обеспечивает равномерное покрытие звуковым полем по всему объёму зала и позволяет корректно оценить пространственные эффекты многоканального маскирования.

Акустическая модель

Расчёт уровней звукового давления («SPL») выполнялся через математическую модель сферического распространения звука в свободном пространстве. В учёт бралось геометрическое ослабление согласно закону обратных квадратов.

Для упрощения задачи реверберация и звуковые отражения от стен не учитывались. Данный подход позволил сосредоточиться на влиянии конфигурации источников и изучения зависимости распределения аудишума от его мощности. Полнота распространения звука несмотря на характер среды рассматривалась как двумерная математическая модель:

$$L(x, y) = L_m,$$

$$L(i) = i - 20 \cdot \log(f(x)(10^{*r*i})),$$

$$L(i)(x, y) = L(l_m, i) - 20 \cdot \log_{10}(r, i),$$

где L_m — уровень плотности распространения звука на 1 кубический метр,

$L(i)$ — аналогичный показатель, но уже в трёхмерном пространстве,

r_i — расстояние от источника звука до фиксирующего элемента в метрах (чувствительный микрофон).

Суммарный уровень маскирующего шума ΣL определялся по энергетическому принципу логической суммы, т.е.:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log(10(\Sigma(10i, Li/10))),$$

$$L_{\Sigma} = 10 / \log(\Sigma(10^{*Li}, Li/10)),$$

$$L_{\Sigma} = 10 * \log_{10}(\Sigma(10, Li/10)).$$

Речевой источник на расстоянии 1 метра показал уровень шума относительно параметра «SPL» равный 65 дБ. Источник маскирующего шума на аналогичном расстоянии 75 дБ. В качестве горизонтальной плоскости определена высота 1.5 м, шаг сетки — 5 см. Такая конфигурация позволяет более детально сформировать карту распределения уровней звука.

Критерий оценки латентности

Для количественной оценки эффективности маскирования использовался показатель «SNR», то есть отношение уровня сигнала к фоновому шуму. Сформирована следующая математическая модель:

$$SNR(x, y) = L(s(x, y)) - L(m(x, y)),$$

$$SNR(x, y) = L(t(s(x, y))) - L(t(m(x, y)))$$

По результатам обработки датасета значений, сформированного после анализа речи на предмет её разборчивости и применения алгоритмов автоматизированного распознавания речи, были определены 3 промежутка «SNR»-показателей, описывающие степень приватности (неразборчивости аудио):

1. Хорошая приватность: «SNR» < -10 дБ
2. Удовлетворительная приватность: -10 дБ ≤ «SNR» < -5 дБ
3. Недостаточная приватность: «SNR» ≥ -5 дБ.

Таким образом, разработанная в рамках текущего исследования методика сделала возможным проведение качественную и количественную оценку зон акустической защиты речи в пределах помещения при многоканальном маскировании.

Моделирование и анализ

На основе описанной выше методики была выполнена серия расчётов по распределению уровней звуково-

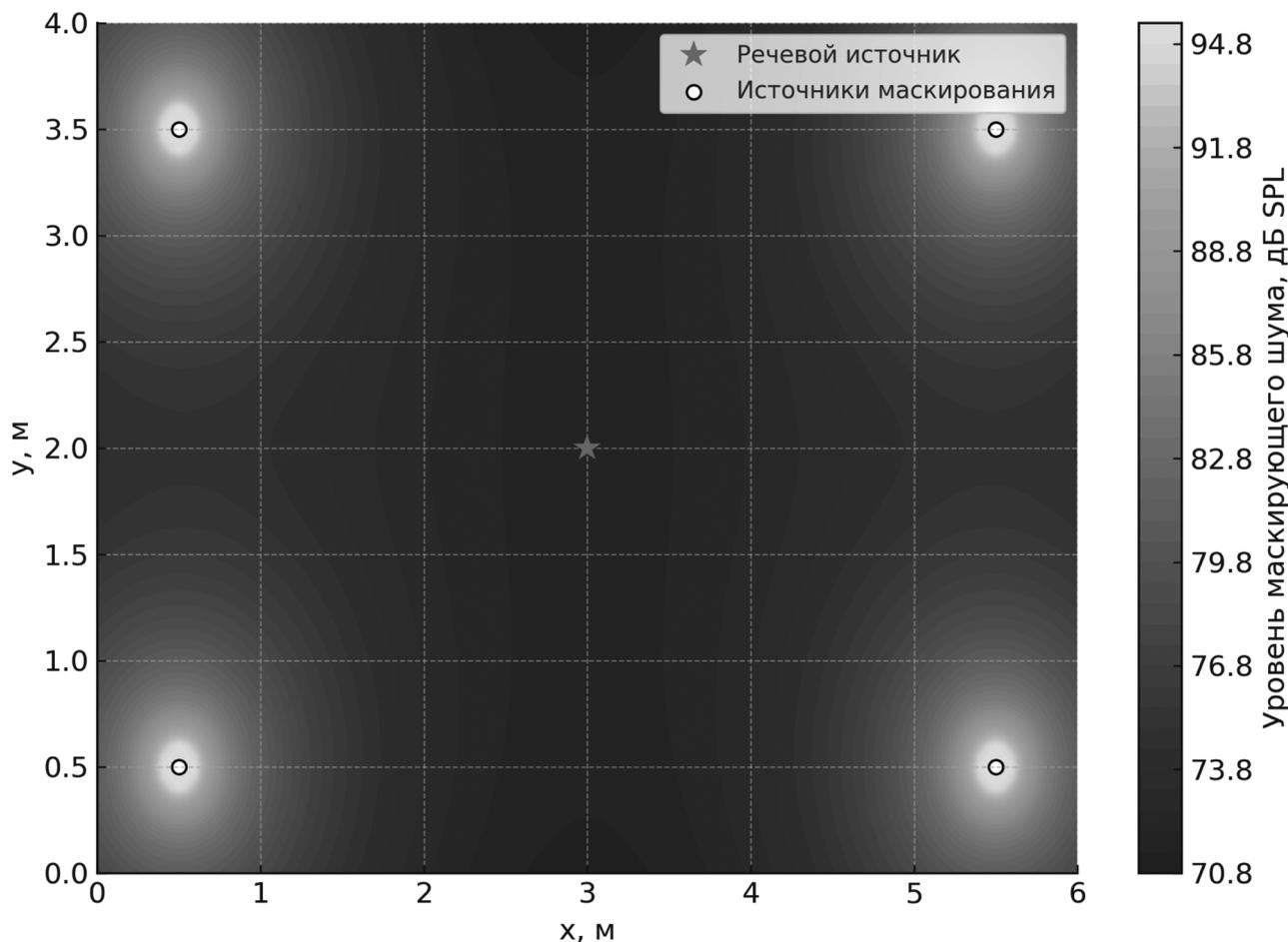


Рис. 1. Распределение уровней шумового давления («SPL») в помещении при условии активного многоканального маскирования

го давления («SPL») и отношения сигнала к шуму («SNR»). В результате моделирования была сформирована «SPL»-карта, представленная на Рисунке 1.

На Рисунке 1 продемонстрировано пространственное распределение маскирующего шума, создаваемого четырьмя источниками, расположенными по углам помещения. Многоцветная шкала отображает уровень «SPL» в децибелах относительно звукового давления на расстоянии одного метра от источника звука.

Из анализа карты следует, что наиболее высокие уровни шума, т.е., до 75 дБ «SPL» наблюдаются вблизи углов, там же, где расположены источники маскирующего звукового сигнала.

В центральной области уровень шума снижается до 69 дБ, а на противоположных стенах — до 66 дБ «SPL». Таким образом, обеспечивается достаточно равномерное распределение звукового поля без выраженных аномалий по уровню громкости.

Оценка отношения сигнала к фоновому шуму («SNR»)

Для оценки эффективности маскировки звукового сигнала были рассчитаны значения «SNR» для всей ис-

следуемой площади. Результаты расчётов сформировали три следующих вывода:

1. Вблизи речевого источника (радиус до 0.5 м) наблюдаются значения «SNR» от -3 до -5 дБ, что говорит о зоне недостаточной латентности.
2. На расстояниях от 0.5 до 2 м формируется область с отличным от первой диапазоном «SNR». То есть, от -7 до -10 дБ, что соответствует удовлетворительному уровню приватности.
3. На периферийных областях помещения (более 2 м от центра) заметны значения «SNR» ниже -10 дБ. Другими словами, это зона повышенной латентности звука, где он полностью маскируется активным фоновым шумом.

Таблица 1.

Эффективность маскировки звукового сигнала

Эффективность	Диапазон «SNR», дБ	% от общей площади помещения
Высокая	< -10	58 %
Удовлетворительная	от -10 до -5	32 %
Плохая	≥ -5	10 %

Результаты расчётов показывают, что при выбранной конфигурации источников активного фонового шума, обеспечивается высокая степень покрытия: около 90 % площади помещения находится в зонах с достаточной или полной маскировкой аудиоинформации. Однако, вблизи источника звука, сохраняются участки, где уровень фонового шума недостаточен для полной маскировки.

Площадь таких участков может быть уменьшена за счёт повышения частоты звуковых колебаний или монтажа дополнительного центрального шумового излучателя с однонаправленной (лучевой) траекторией последовательности случайных звуковых сигналов. Таким образом, проведённый анализ подтвердил эффективность многоканального маскирования речи и привёл к выводу, что равноудалённое размещение источников активного фонового шума по периметру помещения позволяет достичь высокой степени акустической приватности без значительного увеличения уровня шума.

Результаты и обсуждение

На упомянутом выше Рисунке 1 представлена карта уровней маскировки шума при условии присутствия четырёх источников активного фонового шума, установленных вблизи углов помещения. Максимальные значения латентности звука наблюдаются в непосредственной близости источников и вдоль стен. Минимальные — в центральной части переговорной комнаты. Результаты автоматизированного моделирования относительно площади рассматриваемого помещения указаны в Таблице 2.

Таблица 2.

Распределение «SNR» по участкам исследуемой комнаты

«SNR»-значение	Площадь помещения
< -10 дБ, высокое	77.5 %
от -10 до -5, удовлетворительное	14.4 %
≥ -5 дБ, низкое	8.1 %

По результатам анализа и исходя из Рисунка 1, помимо распределения показателей относительной доступности звукового канала связи, заметно значение активного фонового шума в 75 дБ на 1 м, где данный показатель достаточен для маскировки 70 % площади помещения.

Зона умеренного и повышенного рисков — оставшиеся 30% пространства. Там необходимо применять другие контрмеры, например увеличение мощности фоновых помех локальных источников или экранирование.

Заключение

Формирование логической модели переговорной комнаты и проведения автоматизированного эксперимента показало, что при предложенных параметрах латентности звука и активного фонового шума достигается высокий показатель покрытия помещения необходимым уровнем маскировки звука. В то же время, почти незащищённым остаётся область рядом с источником речевых колебаний, здесь требуется дополнительное экранирование.

В работе проведён анализ эффективности многоканальной маскировки речи в типовой переговорной комнате с использованием четырёх источников латентного шума. Разработанная модель позволила оценить пространственное распределение уровней звукового давления и отношения сигнала к фоновому шуму, что определило степень акустической приватности. По результатам эксперимента были определены следующие основные выводы:

1. Многоканальное размещение источников по периметру помещения обеспечивает равномерное звуковое поле и снижает вероятность образования участков без фонового шумового воздействия.
2. Более 85 % площади помещения будет являться безопасной, т.к. показатель «SNR» здесь < -5 дБ.
3. Наиболее уязвимой остаётся область в непосредственной близости к источнику звука, т.е., участок, где просто недостаточная громкость для полной маскировки шумом.

Практическая реализация предложенной схемы многоканального маскирования может быть использована при проектировании систем акустической защиты переговорных комнат, ситуационных центров и объектов с повышенными требованиями к конфиденциальности информации. Для дальнейших исследований планируется учесть влияние реверберации и отражений от стен. В такой реализации можно будет провести экспериментальную верификацию модели с использованием реальных измерений звукового давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.Е., Сидоров А.П. Методы акустической защиты информации в помещениях. — Вопросы защиты информации, 2021. — № 3. — С. 25–34.
2. Кузнецов И.Н., Орлов А.В. Анализ эффективности систем маскирования речи на основе адаптивного шума. — Информационные технологии и безопасность, 2022. — Т. 29, № 2. — С. 41–49.
3. Bradley J.S., Sato H., Picard M. On the importance of early reflections for speech in rooms. — Journal of the Acoustical Society of America, 2003. — Vol. 113, No. 6. — pp. 3233–3244.
4. Борисов П.И., Еремин А.А. Пространственные методы акустического маскирования речи. — Безопасность информационных технологий, 2023. — № 1. — С. 12–20.
5. Kleiner M., Tichy J. Acoustics of Small Rooms. — CRC Press, 2014. — 431 p.

© Мадида Джуссе Шарлен (Charlenemadida@gmail.com); Иванов Владимир Алексеевич (ivanov@fa.ru);

Крепак Иван Павлович (arafoxnis@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»