

Бинауральный слух – Роль локализации звуков (продолжение)

(Wayne Staab – hearinghealthmatters.org)

В предыдущей публикации мы уже рассматривали роль межушной разности интенсивности в локализации звуков. Вторым по значению фактором, участвующим в локализации, является время поступления звука в правое и левое ухо

Межушная разность времени поступления звука (МРВ)



Рис. 1: Звук, поступающий из расположенного фронтально источника, достигает ушей практически одновременно, без межушной задержки. L = левое ухо; R = правое ухо.

В естественных условиях звуки, возникающие в окружающей среде, распространяются по воздуху и достигают обеих ушей. Скорость звуковых волн в воздухе высока, но, тем не менее, время, затрачиваемое на распространение звука, может обеспечить слуховую систему дополнительной информацией о расположении источника звука. Если источник находится непосредственно перед слушателем (рис. 1), расстояние от источника до каждого из ушей одинаково, и звук поступает в оба уха одновременно. Иными словами, если источник звука находится по азимуту 0 или 180°, МРВ равна нулю.



Рис. 2: Межушная разность времени поступления (МРВ) звука в уши. В данном случае расстояние до левого уха (L) больше, чем до правого (R), поэтому звуковые волны доходят до правого уха чуть раньше, чем до левого.

Если же звук поступает из любого другого направления, кроме 0 или 180°, он доходит до правого и левого уха неодновременно. Разность времени поступления зависит от азимута, но максимальная междушная разность времени поступления звука (МРВ) отмечается при азимуте 90° или 270° (рис. 2). В горизонтальной плоскости это соответствует задержке поступления звука в контралатеральное (относительно источника сигнала) ухо приблизительно на 0,6 мс (рис. 3). Слуховая система человека способна реагировать на очень незначительную МРВ, соответствующую нескольким градусам азимута.

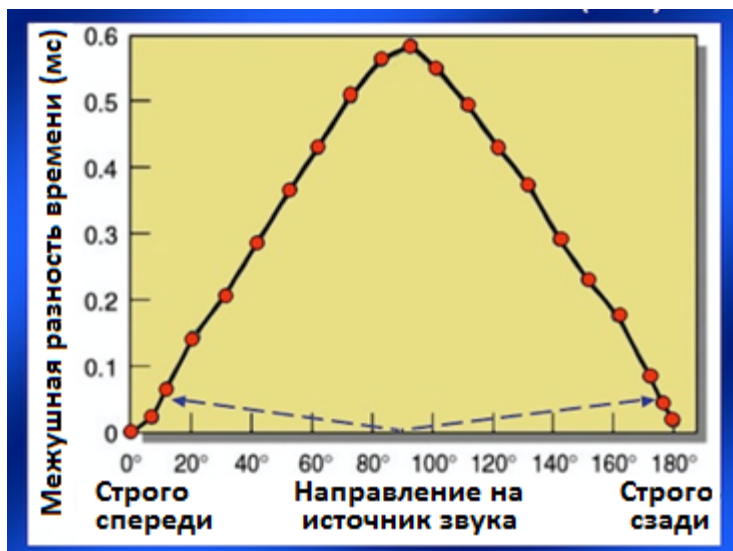


Рис. 3: Междушная разность времени (МРВ) при изменении азимута от 0 до 180°. При различном значении горизонтального азимута МРВ может быть одинаковой (например, точки, отмеченные синими пунктирными линиями). Обратите внимание, что МРВ может быть одинаковой при поступлении звука спереди и сзади, что приводит к ошибкам переднезадней локализации.

Хотя слуховая система использует для локализации оба параметра (МРИ и МРВ), МРВ играет ведущую роль в этом процессе, если частота звука ниже 1500 Гц.

Дуплексная теория локализации звука

Дуплексную теорию локализации звука, учитывающую как междушную разность интенсивности (МРИ), так и междушную разность времени (МРВ), разработал лорд Рэлей в 1877-1907 гг. Согласно этой теории, МРВ используется для локализации низкочастотных звуков, а МРИ – для локализации высокочастотных звуков.

Взрослые люди плохо локализуют звуки частотой 2000-4000 Гц, т.к. в этом диапазоне как МРВ, так и МРИ обладают низкой чувствительностью. Кроме того, как уже отмечалось выше, одинаковые МРВ и МРИ могут быть связаны с различными пространственными азимутами, что приводит к неопределенности и ошибкам локализации, особенно в переднезаднем направлении. Именно с этим связан т.н. “конус неопределенности” (рис. 4).

Ушная раковина отбрасывает акустическую тень для звуков, источник которых расположен позади слушателя. Амплитуда поступающих сзади звуков частотой свыше 2000 Гц на 2-3 дБ ниже по сравнению со звуками, поступающими спереди. Связанные с этим спектральные различия служат дополнительной информацией, для переднезадней локализации и определения угла возвышения [1].

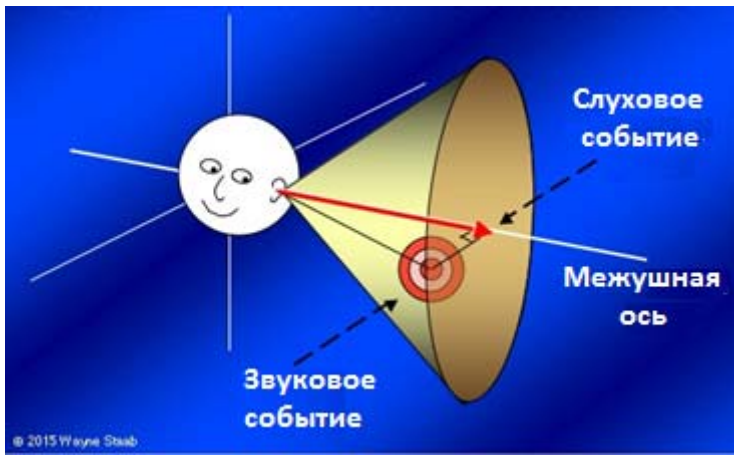


Рис. 4: Конус неопределенности, связанный с недостаточностью межушной информации. Однако нормально функционирующая слуховая система человека, как правило, справляется с решением подобной задачи.

Конус неопределенности. Сами по себе межушные различия не обеспечивают информацию о том, находится ли источник звука впереди, позади, сверху или снизу. Например, звук поступающий справа под углом 45° , обладает такой же МРВ, что и звук, поступающий справа под углом 135° . Это справедливо и для звуков, поступающих слева под углом 225° и 315° .

Дополнительную неопределенность создают звуки, поступающие сверху и снизу. Иными словами, конус неопределенности может возникнуть в любом положении между строго слева и строго справа от головы слушателя. К счастью для нас, нормально функционирующая слуховая система, как правило, справляется с решением подобной задачи.

Улучшение локализации

Уменьшить ошибки локализации можно, повернув голову. Однако на это уходит около 500 мс – значительное время по нейронным стандартам. За счет ушной раковины звук проходит "дополнительную обработку" перед поступлением в слуховой проход. Роль этой пассивной функции зависит от направления на источник звука и его частоты. Следует отметить, что ушная раковина, в основном, участвует в вертикальной локализации звуков.

Что происходит, если уши слышат по-разному?

Altschuler и Comalli [2] установили, что при надлежащей коррекции даже "разные" по слуху уши способны эффективно использовать необходимую для локализации информацию (время, фазу и интенсивность).

Быстрая проверка локализации

Описанная ниже процедура была предложена Comalli и Altschuler [3] в 80х годах прошлого века. Они советуют приобрести маленький и недорогой динамик, который можно было бы перемещать вокруг головы слушателя по кругу радиусом около 30 см. Слушатель должен с закрытыми глазами определить положение источника звука при его перемещении справа налево или слева направо, произнося "слева", "справа", "посередине". В качестве сигнала можно использовать узкополосные шумы. В норме "середина" находится по азимуту, соответствующему $0^\circ \pm 10^\circ$. Если слуховые аппараты не обеспечивают такой точности локализации, авторы рекомендуют заменить их на другие, дающие более близкие к "нормальным" результаты. Этот тест также можно использовать для слуховых аппаратов, обладающих адаптивной или фиксированной направленностью.

Практические рекомендации

Для максимального восстановления локализационных способностей необходимо бинауральное слухопротезирование, хотя у слабослышащих людей способность к локализации снижена по сравнению с нормально слышащими людьми [4].

Локализацию следует пытаться улучшить, даже при плохой разборчивости речи. Слушатель будет чувствовать себя комфортнее, если сможет точно локализовать говорящего.

Возможно, локализация должна быть второй по важности, после обеспечения слышимости, задачей слухопротезирования. Можно ли считать восстановление локализации более важной задачей, чем улучшение разборчивости речи? Над этим следует подумать.

Литература

1. Blauert J. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge, MA. The MIT Press, 1997.
2. Altschuler, M.W., and Comalli, P.C. (1979).
3. Comalli, P.C., and Altschuler, M.W. (1980). Auditory localization: methods, research, application, in *Binaural Hearing and Amplification*, Libby (Ed.), Zenetron Inc.
4. Vaillancourt V., Laroche C, Giguere C, Beaulieu M, Legault J. (2011). Evaluation of auditory functions for Royal Canadian Mounted Police Officers. *J Am Acad Audiol* 22(6):313-331.