

Направленные микрофоны: как они работают?

Дэвид Джеймс Кроуэн (David James Crowhen), BSc, MAud

Crowhen, D. (2019). *Providing some direction – beamformers explained*. *AudiologyOnline*, Article 26260.

Ссылка: <https://www.audiologyonline.com/articles/providing-some-direction-beamformers-explained-26260>

Понятие ближнего и дальнего поля

Пребывание в шуме – одна из основных проблем людей со сниженным слухом (Dillon, 2012). Для ее решения разработано несколько технологий. Эффективность каждой из них зависит от ряда факторов, таких как характер шума, его уровень и направление поступления. Кроме того, важную роль играет расположение источника полезного сигнала – в ближнем или в дальнем поле (рис. 1).



Рис. 1: Схема, иллюстрирующая различия между ближним и дальним полем. Показаны также решения для различных ситуаций.

Граница между ближним и дальним полем зависит от акустической обстановки и условий прослушивания, но чаще всего находится на расстоянии около 1,5 от слушателя.

В этой статье мы остановимся на наиболее распространенном решении для ближнего поля – направленных микрофонах. Мы также постараемся рассказать о том, как они работают, чтобы пояснить используемую для описания их функций терминологию, иногда жаргонную. Вообще, принцип направленности основан на предположении, что в шумной обстановке люди стараются повернуться лицом к тому, кого хотят услышать. Поэтому направленные микрофоны обеспечивают высокую фронтальную чувствительность, одновременно ослабляя звуки, поступающие сзади. Их эффективность хорошо изучена; доказано, что они существенно повышают отношение сигнал-шум (ОСШ) по сравнению с всенаправленными (ненаправленными) микрофонами (напр., Gravel с соавт., 1995; Valente с соавт., 1995). Итак, как работают направленные микрофоны?

Как работают направленные микрофоны?

Системы направленных микрофонов большинства слуховых аппаратов состоят из двух микрофонов – переднего (M1) и заднего (M2) (рис. 2). Такую систему иногда именуют моноауральным формирователем луча направленности.

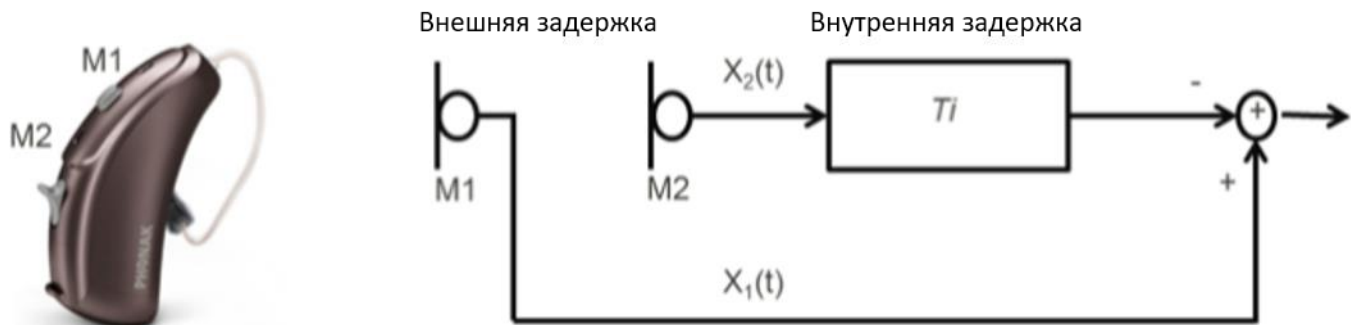


Рис. 2: Упрощенная схема работы направленного микрофона, иллюстрирующая принцип создания разной чувствительности к звукам, поступающим из разных направлений. Используется с разрешения Michael Kramer с соавт.

Если предположить, что звук поступает сзади, он вначале достигнет заднего микрофона (M2) и лишь затем – переднего (M1). Эта внешняя задержка зависит от физического расстояния между микрофонами. Таким образом, передний и задний микрофоны реагируют на один и тот же звук в разные моменты времени. На рис. 2 внутренняя задержка сигнала обозначена $X_2(t)$, а внешняя – $X_1(t)$. Учтите, что для достижения заметного эффекта направленности расстояние между микрофонами должно превышать некоторый минимум. В процессе обработки можно создать дополнительную внутреннюю задержку сигнала заднего микрофона, чтобы при сложении он оказался в противофазе с сигналом переднего микрофона. Так создается дифференциальная чувствительность к звукам, поступающим из разных направлений. На рис. 3В представлена кардиоидная полярная диаграмма, соответствующая соотношению внутренней и внешней задержки 1,0. Мы наблюдаем максимальную чувствительность (иногда именуемую лучом) в переднем направлении, а максимальную аттенюацию (так называемый "нуль") – строго по азимуту 180° .

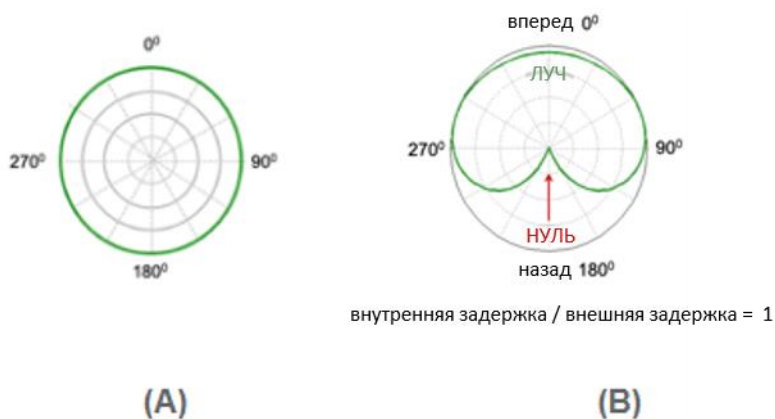
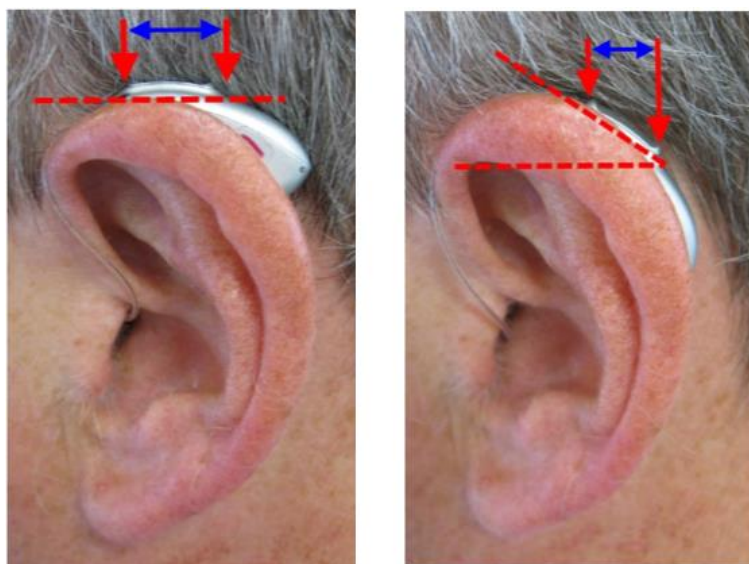


Рис. 3: Полярные диаграммы, иллюстрирующие чувствительность микрофона к звуку, поступающему из разных направлений. Внешняя окружность соответствует аттенюации 0 дБ. Каждая последующая концентрическая окружность соответствует дополнительной аттенюации. (А) – всенаправленный (ненаправленный) микрофон с одинаковой чувствительностью по всем направлениям. (В) – микрофон с кардиоидной характеристикой; максимальная чувствительность (луч) отмечается в переднем направлении, а минимальная (нуль) – по азимуту 180° . Используется с разрешения Michael Kramer с соавт.

Зависимость направленности от расположения микрофонов

Хотя фактическое физическое расстояние между микрофонами фиксировано, "эффективное" расстояние зависит от расположения слухового аппарата за ухом. При оптимальном размещении аппарата передний и задний микрофоны располагаются почти горизонтально (рис. 4А). Это означает, что физическое расстояние между микрофонами практически совпадает с эффективным. Однако, если переместить слуховой аппарат дальше за ухо, взаимное расположение переднего и заднего микрофонов отклонится от горизонтальной плоскости, что уменьшит эффективное расстояние между ними (рис. 4В).



(A)

(B)

Рис. 4: (A) Оптимальное размещение слухового аппарата за ухом – передний и задний микрофоны расположены практически в горизонтальной плоскости. (B) Слуховой аппарат перемещен дальше за ухо. Угол наклона корпуса аппарата увеличивается и, соответственно, уменьшается эффективное расстояние между микрофонами. Эффективное расстояние в обоих случаях отмечено синей стрелкой.

Чем больше угол наклона, тем меньше эффективное расстояние между двумя микрофонами. Чем ближе друг к другу микрофоны, тем меньшую направленность они могут создавать (и тем больше низкочастотная отсечка) (Ricketts, 2001). На рис. 5 представлено влияние угла наклона плоскости микрофонов на направленность. Это влияние зависит от частоты, проявляясь преимущественно на высоких частотах, где снижение слуха, как правило, выражено больше всего (Margolis, Saly, 2008). Fels (2016) представил данные о влиянии угла наклона микрофонов на направленность для заушных слуховых аппаратов (BTE) и аппаратов с выносным ресивером (RIC), выполнив измерения на мужчинах, женщинах, детях и манекене KEMAR. Эти данные показали большой разброс углов наклона микрофонов. В случае BTE угол наклона превышал 35° почти в четверти случаев, что соответствует снижению направленности приблизительно на 1 дБ (рис. 5). У RIC ситуация была еще хуже: в 70% случаев угол наклона микрофонов превышал 35° , а в 30% случаев – 45° , что снижает направленность примерно на 2 дБ (рис. 5). В зависимости от речевого материала, отношения сигнал-шум (ОСШ) и стартовой точки кривой интенсивность/разборчивость, это может привести к значительному ухудшению разборчивости речи (MacPherson, Akeroyd, 2014).

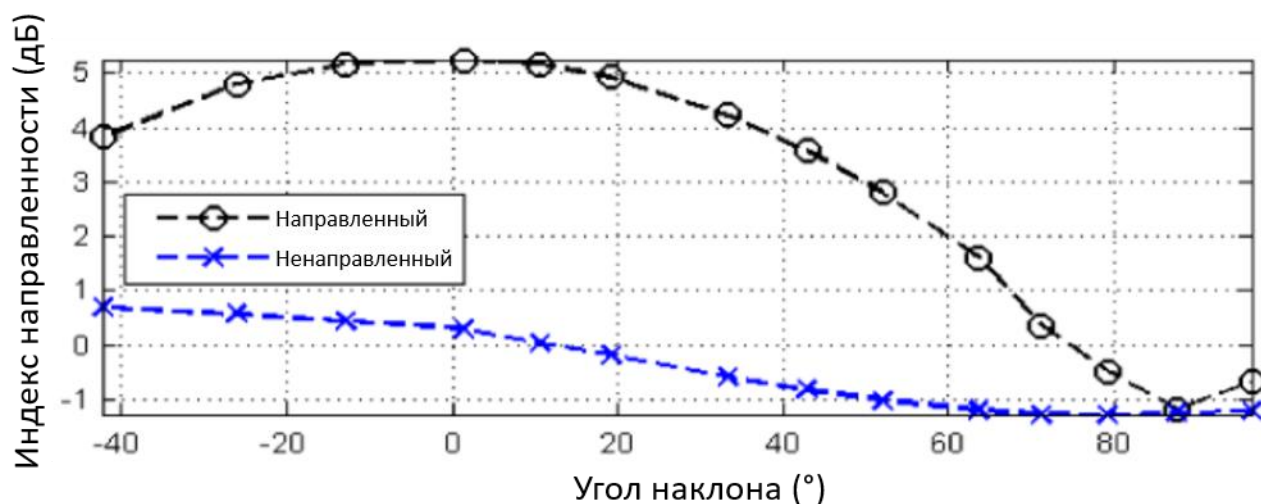


Рис. 5: Зависимость индекса направленности в условиях диффузного шума от угла наклона плоскости микрофонов слухового аппарата. Используется с разрешения Stefan Launer.

Любопытно, что у женщин отмечена тенденция к большему углу наклона микрофонов, чем у мужчин. Возможно, это связано с меньшими размерами ушной раковины. Число детей, включенных в цитируемое

исследование, было слишком маленьким, чтобы прийти к каким бы то ни было выводам. Таким образом, длина звуковода или провода ресивера важна не только для надежной фиксации слухового аппарата (и меньшей его заметности), но еще и для оптимального функционирования направленности. Поэтому я рекомендую всегда проверять угол наклона микрофонов слухового аппарата в ходе его подбора и настройки.

Согласование микрофонов и дрейф

Для оптимальной работы системы направленности, состоящей из двух (или более) микрофонов, необходимо согласование микрофонов по уровню и фазе (Ricketts, 2001). В противном случае направленность снижается, особенно в области низких частот. Ricketts (2001) приводит пример, когда рассогласование в 1 дБ привело к снижению направленности на 4 дБ на частоте 500 Гц! Этот эффект дрейфа увеличивается по мере сокращения расстояния между микрофонами, что еще раз подчеркивает необходимость горизонтального их расположения. Дрейф может возникнуть из-за воздействия загрязнения, влаги и т.п. на отверстия, фильтры и диафрагмы микрофонов. Профилактика лучше, чем лечение – поэтому необходимо следить за чистотой входных отверстий микрофонов. Кроме того, некоторые производители используют компенсаторные системы, слегка изменяющие выходное усиление микрофонов, чтобы скорректировать возможное их рассогласование (Ricketts, 2001; Kidmose, 2013). Наконец, существуют системы измерения электроакустических параметров слуховых аппаратов (например, AudioScan), позволяющие оценить работу направленных микрофонов в тестовой камере (Wu, Bentler, 2012).

Адаптивные формирователи луча направленности

Вернемся к полярным диаграммам

Мы знаем, что в реальной жизни источник преобладающего шума не обязательно расположен строго позади пользователя слуховых аппаратов. В ряде случаев он может оказаться и сбоку (справа/слева) от пользователя. При этом кардиоидная характеристика не обеспечит оптимальную аттенуацию шума и, следовательно, максимальное ОСШ. В таком случае можно применить дополнительную внутреннюю задержку сигнала $X_2(t)$, изменив характер полярной диаграммы и сместив ее нулевую точку (рис. 6). Способность изменять время внутренней задержки для модификации полярной диаграммы известно под названием "адаптивная направленность".



Рис. 6: Варианты полярных диаграмм, полученные путем изменения внутренней задержки сигнала $X_2(t)$ относительно фиксированной внешней задержки $X_1(t)$. Используется с разрешения Michael Kramer с соавт.

У современных слуховых аппаратов скорость обработки столь высока, что изменять время задержки сигнала можно практически в реальном времени. Это позволяет перемещать нуль диаграммы вслед за движущимся позади пользователя источником шума. Bentler с соавт. (2006) сравнивали эффективность 2- и 3-микрофонных формирователей направленности, а также использование фиксированного и адаптивного алгоритмов их работы. Результаты подтвердили, что в условиях стационарного шума направленные системы, независимо от количества микрофонов, улучшают разборчивость речи по сравнению с ненаправленными микрофонами (НМ). При перемещении источника шума адаптивные системы оказались эффективнее фиксированных 2-микрофонных систем. Blamey с соавт. (2006) изучали разборчивость речи в фоновом шуме (стационарном и перемещающемся) с использованием адаптивных направленных микрофонов (АНМ). Согласно результатам

теста разборчивости речи в шуме (HINT, Nilsson с соавт., 1994), фиксированные направленные микрофоны (ФНМ) и АНМ эффективнее ННМ, а АНМ эффективнее ФНМ при расположении источника шума по азимуту 180°. В Нью-Йоркском тесте разборчивости фразовой речи (CUNY) (Boothroyd с соавт., 1985, цитируется по Blamey с соавт., 2006) АНМ продемонстрировали более высокую эффективность, чем ФНМ, при расположении источника шума по азимуту 180° или при движении источника шума. Согласно субъективным данным, АНМ оказались предпочтительнее ННМ в 54% случаев, тогда как ННМ были предпочтительными лишь в 17% случаев; в 29% случаев предпочтение не было сформулировано. Таким образом, АНМ не только эффективнее, но и предпочтительнее в ситуациях с движущимся источником шума.

Многоканальные/многополосные формирователи направленности

Входной сигнал микрофонов может отдельно обрабатываться в частотных каналах/полосах. Учтите, что они не совпадают с каналами, в которых мы меняем усиление, используя программу настройки. На рис. 7 представлена схема работы направленного микрофона, разделяющего входной сигнал на 3 канала – низкочастотный (НЧ), среднечастотный (СЧ) и высокочастотный (ВЧ). Такой формирователь направленности позволяет создавать различные полярные диаграммы в каждом канале, регулируя положение нуля в соответствии с преобладающим источником шума в отдельной частотной области.

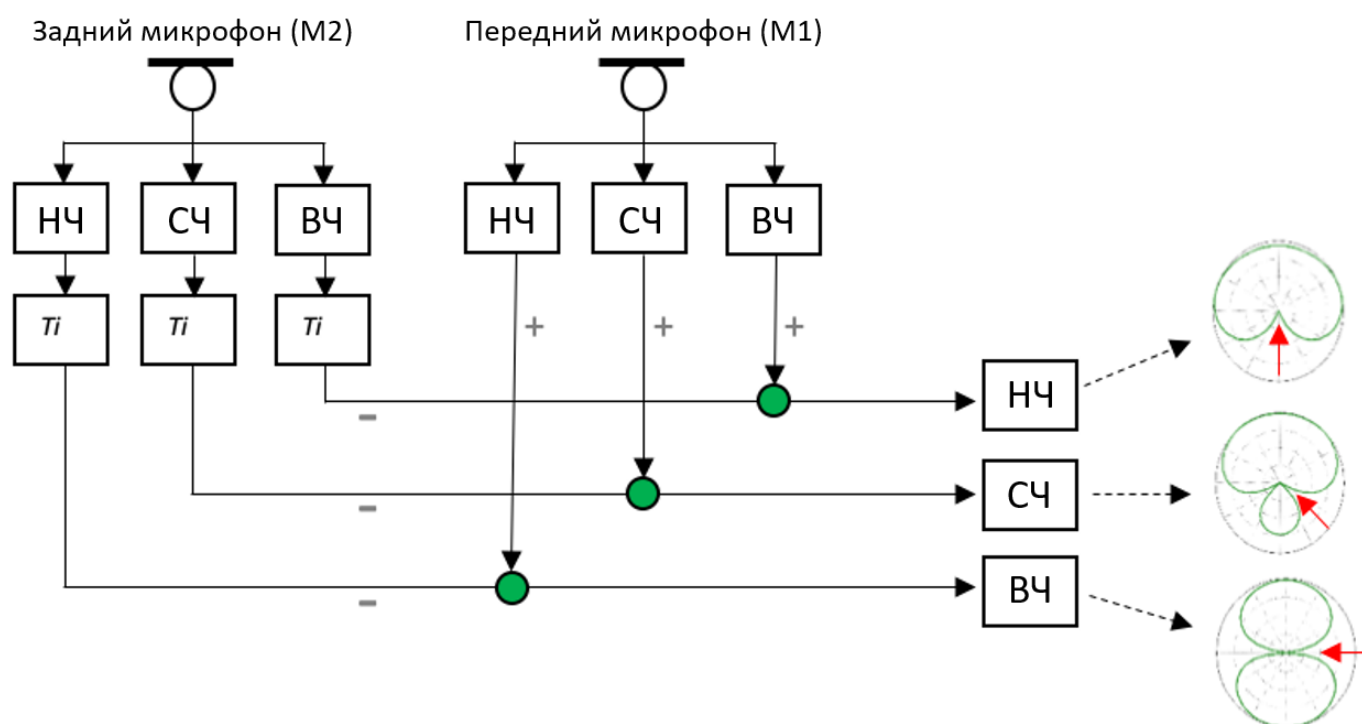


Рис. 7: Схематическое изображение 3-канального адаптивного формирователя направленности. Наличие нескольких каналов позволяет направлять ноль полярной диаграммы в сторону преобладающего источника низко-, средне- или высокочастотного шума. T_i : внутренняя временная задержка. НЧ, СЧ, ВЧ: низкие, средние и высокие частоты, соответственно.

Применение различных полярных диаграмм на отдельных частотах обладает несколькими потенциальными преимуществами. Например, мы можем использовать различные полярные диаграммы для более эффективной аттенюации различных по частоте источников шума. Другое преимущество заключается в локализации звука при использовании заушных слуховых аппаратов. Низкочастотные звуки с большей длиной волны огибают ушную раковину, тогда как более коротковолновые высокочастотные звуки подвергаются дифракции, создавая естественную направленность и способствуя передне-задней локализации. Размещая микрофоны слухового аппарата за ухом, мы теряем эту важную информацию. Решить проблему можно путем сочетания ненаправленной низкочастотной диаграммы с направленной диаграммой на более высоких частотах. Согласно полученным в одном из исследований результатам, такая "смешанная" стратегия снижает вероятность ошибок передне-задней локализации приблизительно на 21% (Phonak FSN, 2005).

Установлено также, что такой "смешанный" подход эффективно балансирует уменьшение шума ветра и оптимизацию восприятия речи на ветру. Микрофоны слухового аппарата предназначены для улавливания изменений звукового давления, однако турбулентность в области входных отверстий микрофонов,

создаваемая ветром, также приводит к изменениям давления воздуха, преобразуемым в электрический сигнал и воспринимаемым как низкочастотный шум (Chung, 2012). Chung (2012) изучал шум, создаваемый ветром различной скорости при использовании ННМ, АНМ и смешанного режима (ННМ до 1000 Гц, АНМ на частотах свыше 1000 Гц). Согласно полученным результатам, смешанный режим позволяет снижать уровень шума ветра за счет использования ННМ на низких частотах и при этом успешно подавлять высокочастотный шум благодаря использованию направленных микрофонов на более высоких частотах. Напомним, что именно в этой частотной области содержится основная речевая информация (Pavlovic, 2018; Pavlovic, 1984).

Цифровое шумоподавление

Традиционные алгоритмы цифрового шумоподавления используют временную информацию, чтобы отличить речь (сигналы с более высокой временной модуляцией) от шума (сигналы с более низкой временной модуляцией) и снизить усиление в каналах, где преобладает шум. Такое снижение усиления применяется вне зависимости от режима микрофонов, а между тем это – упущенная возможность, потому что при пребывании в направленном режиме известно расположение источника полезного сигнала: он находится перед пользователем! Пространственная информация, поступающая из формирователя направленности, могла бы быть использована для дополнительного различения поступающей спереди речи и окружающего шума, что позволило бы еще больше повысить ОСШ.

Истинное бинауральное формирование луча направленности

Многие клиенты жалуются на косметические недостатки слуховых аппаратов; размеры устройства могут повлиять на его принятие и использование (McCormack, Fortnum, 2013). Ограничения со стороны размеров в сочетании с необходимостью определенного физического разнесения микрофонов приводят к тому, что большинство традиционных формирователей направленности состоит всего из двух микрофонов (см. рис. 2). Как уже упоминалось, это позволяет значительно повысить эффективность слуховых аппаратов в ближнем поле, но при умеренных/высоких уровнях шума возникают серьезные ограничения. Связь между более высоким коэффициентом направленности и количеством микрофонов, входящих в состав формирователя направленности, хорошо известна (см. Dillon, 2001). Один из способов увеличения количества входящих в формирователь направленности микрофонов без добавления микрофонов в отдельно взятый слуховой аппарат – обмен потоковыми звуковыми сигналами между аппаратами для создания бинауральной направленности (рис. 8а). При этом ширина луча существенно уменьшается (рис. 8b), а эффективность в шуме значительно повышается по сравнению с моноауральным формирователем луча направленности. Результаты пилотного клинического исследования Phonak показали, что StereoZoom (бинауральный формирователь луча направленности Phonak) значительно эффективнее моноаурального формирователя направленности или микрофона с всенаправленной характеристикой у людей с тугоухостью разной степени, в том числе – при использовании открытых стандартных вкладышей (Phonak FSN, 2011). В последующей работе Picois с соавт. (2014) сравнивали эффективность StereoZoom с UltraZoom (моноауральный формирователь луча направленности Phonak) и Real Ear Sound (алгоритм восстановления эффекта ушной раковины в заушных слуховых аппаратах Phonak) при различных значениях ОСШ и уровнях реверберации. Авторы обнаружили, что в близкой к реальной обстановке и умеренных уровнях реверберации StereoZoom обеспечивает значительно лучшую разборчивость речи, чем 2-микрофонные формирователи направленности, независимо от ОСШ.

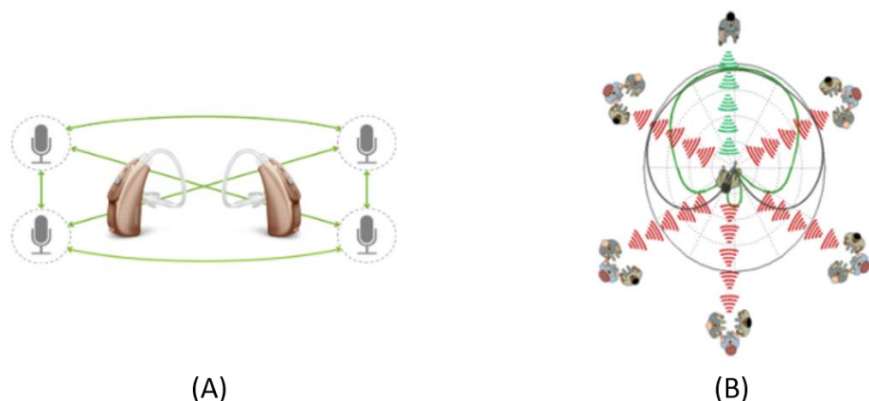


Рис. 8: (А) Схема 4-микрофонного бинаурального формирователя луча направленности. (В) Сравнение бинауральной (зеленая полярная диаграмма) и моноауральной (черная полярная диаграмма) направленности в диффузном шуме. Используется с разрешения Michael Krater с соавт.

В последнее время показатели эффективности слуховых аппаратов дополнены понятиями слухового напряжения и социального взаимодействия. Winneke с соавт. (2018) изучали слуховое напряжение в шуме при использовании различных формирователей направленности. Они принимали во внимание как субъективные оценки, так и объективные показатели, такие как активность в альфа-диапазоне электроэнцефалограммы (ЭЭГ). При использовании бинаурального формирователя направленности ЭЭГ-активность в альфа-диапазоне была ниже, а субъективные оценки были более положительными. В работе Schulte с соавт. (2018) слабослышащим участникам исследования предлагали общаться в специально созданной для этого обстановке. Видеозапись коммуникационного процесса в дальнейшем подвергалась анализу. Чтобы оценить влияние того или иного режима микрофонов на коммуникационное поведение испытуемых (объем речевого общения, наклоны корпуса в сторону собеседника и т.п.), использовался метод слепого выбора варианта направленности. Согласно полученным результатам, использование бинаурального адаптивного формирователя направленности сопровождалось значительным повышением уровня коммуникации (15%) по сравнению с фиксированной моноауральной направленностью, а также меньшими наклонами корпуса в сторону собеседника, что подтверждает преимущества бинауральной системы в отношении ОСШ и восприятия речи.

Истинно бинауральные формирователи направленности не следует путать с системами направленности, координирующими направленность в левом и правом аппарате путем обмена мета-данными. Например, если критерии справа соответствуют переходу в направленный режим, левый слуховой аппарат, в зависимости от особенностей обстановки, может либо перейти в такой же режим, либо оставаться в ненаправленном режиме работы.

Заключение

Формирователи направленности слуховых аппаратов остаются наиболее эффективным средством повышения ОСШ и улучшения разборчивости речи на фоне шума в ближнем поле. Бинауральные формирователи направленности, использующие 4 микрофона и адаптивно функционирующие во многих каналах, обеспечивают в подобной обстановке непревзойденную эффективность.

Литература

- Bentler, R., Palmer, C. & Mueller, H. G. (2006). Evaluation of a second-order directional microphone hearing aid: I. Speech perception outcomes. *J. Am. Acad. Audiol.*, Vol. 17(3): pp. 179-189
- Blamey, P. J., Fiket, H. J. & Steele, B. R. (2006). Improving speech intelligibility in background noise with an adaptive directional microphone. *J. Am. Acad. Audiol.*, Vol. 17(7): pp. 519-530
- Chung, K. (2012). Wind noise in hearing aids: II. Effect of microphone directivity. *International Journal of Audiology*, Vol. 51, 29-42.
- Dillon, H. (2001). *Hearing aids*. Turrumurra, Australia: Boomerang Press
- Gravel, J. S., Fausel, N., Liskow, C., Chobot, J. (1999) Children's Speech Recognition in Noise Using Omni-Directional and Dual-Microphone Hearing Aid Technology. *Ear & Hearing*, Vol. 20(1), 1-11.
- Kidsmore, P. (2013) System method for adaptive microphone matching in a hearing aid. US Patent Application (Patent No. US 8,374,366 B2.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/41/52/7b/6b3dedf64f81e2/US8374366.pdf> Retrieved on 19/10.2019.
- MacPherson, A. & Akeroyd, M. A. (2014) Variations in the Slope of the Psychometric Functions for Speech Intelligibility: A Systematic Survey. *Trend in Hearing*, Vol. 18, 1-26.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4227668/pdf/10.1177_2331216514537722.pdf Retrieved on 19/10/2019.
- McCormack, A. & Fortnum, H. (2013) Why do people fitted with hearing aids not wear them? *International Journal of Audiology*, Vol. 52(5), 360-368. <https://doi.org/10.3109/14992027.2013.769066> Retrieved on 19/10/2019.

- Margolis, R. H. & Saly, G. L. (2008). Distribution of hearing loss characteristics in a clinical population. *Ear & Hear.*, Vol. 29(4): pp. 524-532
- Nilsson M, Soli SD, Sullivan JA. (1994) Development of the Hearing In Noise Test for the measurement of speech reception thresholds in quiet and in noise. *J Acoust Soc Am*, Vol. 95,1085–1099.
- Pavlovic, C. V. (2018) SII—Speech intelligibility index standard: ANSI S3.5 1997. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 143. <https://doi.org/10.1121/1.5036206> Retrieved on 19/10/2019.
- Pavlovic, C. V. (1984) Use of the the articulation index for assessing residual auditory function in listeners with sensorineural hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75, 1253-1258.
- Phonak Field Study News (2005) Real Ear Sound - A simulation of the pinna effect optimizes sound localization also with open fittings. Phonak Field Study News, 2005
- Phonak Field Study News (2011). StereoZoom – Improved speech understanding even with open fittings. Switzerland: Phonak AG.
- Picou, E. M., Aspell, E. & Ricketts, T. A. (2014). Potential benefits and limitations of three types of directional processing in hearing aids. *Ear & Hear.*, Vol. 35(3): pp 339-352
- Ricketts, T. A. (2001) Directional hearing aids. *Trends in Amplification*, Vol. 5(4), 139-176.
- Schulte, M., Meis, M., Krüger, M., Latzel, M. & Appleton-Huber, J. (2018) Significant increase in the amount of social interaction when using StereoZoom:
https://www.phonakpro.com/content/dam/phonakpro/gc_hq/en/resources/evidence/field_studies/documents/fsn_increased_social_interaction_stereozoom_gb.pdf. Retrieved on 19/10/2019.
- Valente, M., Fabry, D. A. & Potts, L. G. (1995) Recognition of Speech in Noise with Hearing Aids Using Dual Microphones. *J Am Acad Audio*, Vol. 16, 440-449
- Fels, L. (2016) Directional microphones: Are we going in the right direction? Exploring the effects of microphone orientation on speech intelligibility in noise. Phonak Audiology Blog:
<https://audiologyblog.phonakpro.com/directional-microphones-effects-of-microphone-orientation/> Retrieved on 16/10/2019
- Winneke, A., Latzel, M. & Appleton-Huber, J. (2018) Less listening- and memory effort in noisy situations with StereoZoom. Switzerland: Phonak AG:
https://www.phonakpro.com/content/dam/phonakpro/gc_hq/en/resources/evidence/field_studies/documents/fsn_stereozoom_eeg_less_listening_effort.pdf Retrieved on 19/10/2019.
- Wu, Y-H. & Bentler, R. A. (2012) Clinical Measures of Hearing Aid Directivity: Assumption, Accuracy, and Reliability. *Ear & Hearing*, Vol. 33(1), 44-56.