

Теоретические основы технологий Phonak

Апрель 2016

SoundRecover2 – адаптивный алгоритм частотной компрессии

Высокочастотные звуки становятся доступнее

Компания Phonak впервые применила современную технологию частотного понижения в 2008 г. В последствии многочисленные клинические испытания с привлечением взрослых и детей подтвердили улучшение обнаружения, различения и распознавания высокочастотных звуков, а также повышение показателей разборчивости речи и исправление интонационных и качественных характеристик голоса пользователей. Однако у людей с наиболее тяжелыми нарушениями слуха, такими как левоугольная или круто нисходящая/обрывистая тугоухость, эффективность оставалась недостаточной из-за ограниченности слышимого диапазона, к которому можно было бы применить частотную компрессию. Новый алгоритм SoundRecover2 нацелен на восстановление слышимости важных высокочастотных звуков с сохранением низкочастотных структур, обуславливающих качество воспринимаемого звука. Новая схема частотного понижения сохранила сущность первоначального алгоритма SoundRecover, добавив к нему адаптивность активации и дополнительную граничную частоту. Это должно повысить эффективность частотной компрессии у людей с тяжелыми/глубокими нарушениями слуха.

Введение

Перераспределение частот с целью расширения воспринимаемого диапазона звуков коммерчески доступно уже около 10 лет. Компания Phonak впервые предложила SoundRecover, нелинейную частотную компрессию, в слуховых аппаратах Naída, представленных в 2008 г. Это решение было направлено на восстановление слышимости высокочастотных звуков, недоступных при традиционном звукоусилении.

Используемый в SoundRecover принцип усиления входного сигнала без искажений основан на том, что в гласных звуках преобладает низкочастотная энергия, тогда как глухие фрикативные звуки отличаются преобладанием высокочастотной энергии. В SoundRecover существует понятие "граничной частоты", т.е. стартовой точки компрессии. К входным сигналам, частота которых ниже граничной частоты, частотная компрессия не применяется. Все входные сигналы с частотой выше граничной, напротив, подвергаются частотной компрессии. Поэтому частота выходных сигналов ниже граничной частоты не изменяется, тогда как все выходные сигналы в диапазоне между граничной и максимальной частотой сжимаются с постоянным коэффициентом компрессии¹. Максимальная частота устанавливается в соответствии с конкретной аудиограммой. Граничная частота не может быть ниже 1,5 кГц. Это обеспечивает сохранность важных гласных звуков. Подробное описание алгоритма частотной компрессии SoundRecover приведено в статье McDermott (2010) [1].

Опыт показывает, что схема частотной компрессии SoundRecover эффективна в отношении речи и высокочастотных звуков, таких как птичье пение. SoundRecover можно успешно использовать, если верхняя граница слышимого диапазона превышает 1,5 кГц, оставляя достаточно места для сжимаемых звуков. Однако коррекция более тяжелой тугоухости (левоугольные, круто нисходящие и обрывистые

¹ Коэффициент компрессии является постоянным при логарифмическом масштабировании оси частот.

аудиограммы) сопряжена с дополнительными трудностями. В таких случаях необходимы более агрессивные настройки параметров (более низкая граничная частота, более высокий коэффициент компрессии), чем те, которые может предложить SoundRecover.

Для преодоления этих ограничений был разработан алгоритм SoundRecover2, допускающий использование более низких значений граничной частоты и меньших коэффициентов компрессии, что расширяет контингент детей и взрослых, у которых можно эффективно применять частотную компрессию.

Функциональное описание SoundRecover2

Основной функциональный принцип

SoundRecover2 – адаптивная схема частотного понижения, основанная на первоначальном варианте SoundRecover. Новый алгоритм сохраняет низкочастотные гласные звуки, сжимая глухие фрикативные звуки, в которых доминирует высокочастотная составляющая. На рис. 1 представлено спектральное распределение различных фонем английского языка².

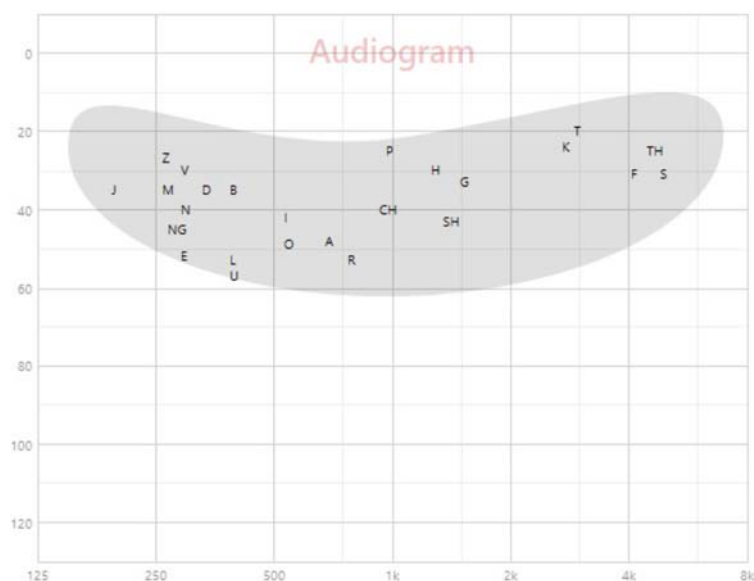


Рис. 1: "Речевой банан", иллюстрирующий частотный состав звуков английской речи.

Существенным отличием SoundRecover2 является то, что неизменяемая область и стартовая точка компрессии не фиксированы, а задаются адаптивно, в зависимости от входного сигнала. Для этого используются две граничные частоты, из которых в каждый момент времени активна лишь одна. Система решает, какую из двух граничных частот следует применить, исходя из мгновенного распределения энергии входного сигнала. Таким образом, функциональный принцип SoundRecover2 аналогичен SoundRecover, отличаясь от последнего наличием двух автоматически переключаемых стартовых точек компрессии, т.е. "нижней" и "верхней" граничных частот. Как и в SoundRecover, частотное понижение всегда происходит с предустановленным постоянным коэффициентом компрессии, вне зависимости от активированной в данный момент граничной частоты.

Итак, SoundRecover2 мгновенно перераспределяет частоту входных компонентов, исходя из их частотного состава, а именно соотношения энергии тональных и шумоподобных звуков. В случае преобладания низкочастотной энергии активируется верхняя граничная частота, "защищающая" низкочастотные звуки от компрессии. Если же преобладают высокие частоты, используется нижняя граничная частота, восстанавливающая слышимость высокочастотных звуков. Применительно к речи это означает, что гласные звуки не изменяются, тогда как высокочастотные фрикативные звуки сжимаются до достаточно низкой частоты. Схема этого адаптивного алгоритма представлена на рис. 2.

² В значительной степени совпадает с русским "речевым бананом".

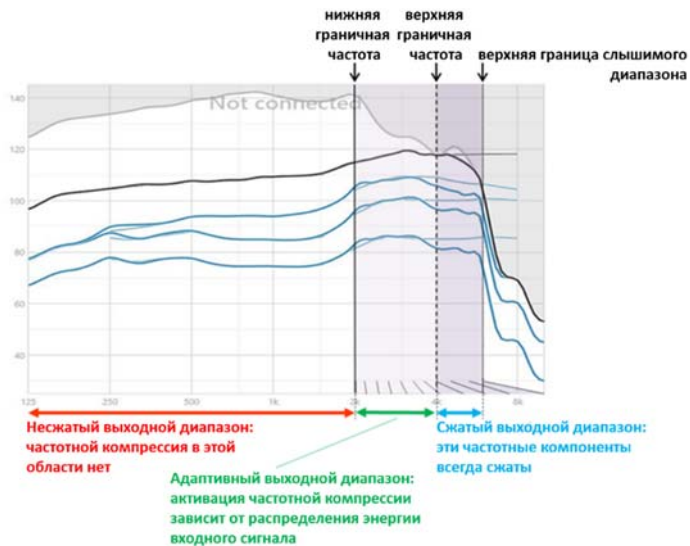


Рис. 2: Пример SoundRecover2. В зависимости от распределения энергии входного сигнала, частотная компрессия начинается либо с нижней, либо с верхней граничной частоты.

Последствия адаптивного функционирования

Последствия адаптивного функционирования SoundRecover2 весьма значительны. Адаптивно задаваемая стартовая точка компрессии обеспечивает частотное понижение компонентов входного сигнала лишь при значительной доле высокочастотной энергии. Поэтому нижняя граничная частота может быть существенно ниже нынешнего предела (1500 Гц), что расширяет область компрессии и позволяет снизить коэффициент компрессии по сравнению с первоначальным вариантом SoundRecover. Верхняя граничная частота может быть достаточно высокой, потому что она задействуется лишь при наличии значительной доли низкочастотной энергии. За счет этого расширяется область "защищенного" (т.е. несжимаемого) сигнала. В результате тональные структуры и прочие низкочастотные компоненты остаются неизменными, сохраняя формантный состав гласных звуков.

Результаты

Адаптивный характер SoundRecover2 позволяет выполнять частотное понижение с более низкой граничной частотой и меньшим коэффициентом компрессии по сравнению с первоначальным вариантом SoundRecover. Высокая верхняя граничная частота обеспечивает лучшее качество звучания, бóльшую естественность и узнаваемость звуков в сочетании с меньшим искажением тональных компонентов. В то же время, более низкое возможное значение нижней граничной частоты означает лучшую доступность высокочастотных звуков при любых вариантах тугоухости. Поэтому диапазон показаний к использованию SoundRecover2 распространяется на лиц с очень ограниченным диапазоном слышимости (тяжелая тугоухость, левоугодные и обрывистые аудиограммы). Иными словами, благодаря новому алгоритму SoundRecover2 больше людей смогут эффективно воспользоваться частотным понижением. Применение более слабых коэффициентов компрессии способствует меньшему искажению спектра среднечастотных входных сигналов, что улучшает распознавание речи и окружающих звуков, повышая показатель спонтанного принятия данной технологии по сравнению с SoundRecover.

На рис. 3 представлены спектрограммы фразы "my name is asa" (май нэйм из аса) без частотного понижения (а), с SoundRecover (b) и с SoundRecover2 (с). На рис. 3а видны выраженные формантные структуры частотой до 5,5 кГц в области 0,2 секунды и две высокочастотные фонемы – /з/ в области 1,2 секунды и /с/ в области 1,9 секунды.

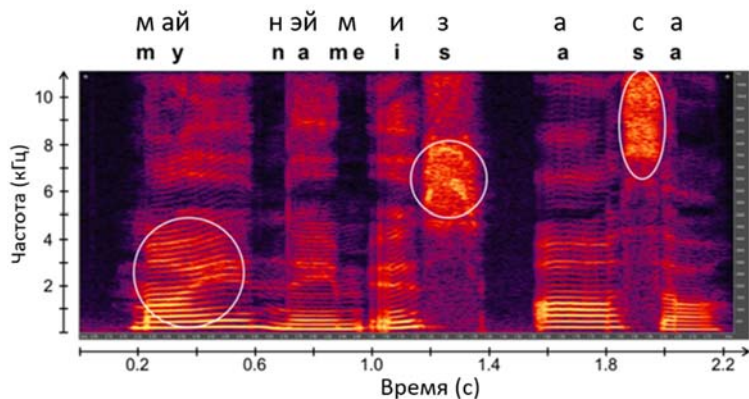


Рис. 3а: Спектрограмма фразы "my name is asa" без частотного понижения.

На рис. 3б представлен результат применения SoundRecover с граничной частотой 1500 Гц и коэффициентом компрессии 2,1; слышимый диапазон достигает приблизительно до 4000 Гц. Фонемы /з/ в области 1,2 секунды и /с/ в области 1,9 секунды сжаты до частотного диапазона 2,5-4 кГц. Обратите внимание, что тонкая спектральная структура на частотах, превышающих граничную частоту (1500 Гц), в начале фразы сохранена не полностью.

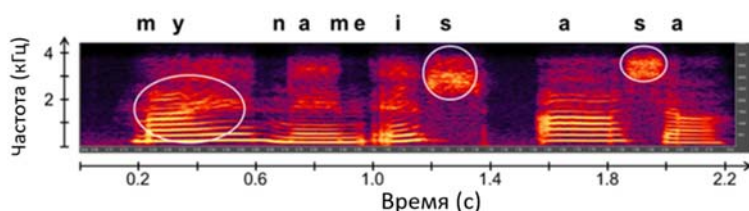


Рис. 3б: Спектрограмма фразы "my name is asa" с SoundRecover (граничная частота 1500 Гц, коэффициент компрессии 2,1).

На рис. 3с представлен результат применения SoundRecover2 с нижней граничной частотой 1479 Гц, верхней граничной частотой 3600 Гц и коэффициентом компрессии 1,4; слышимый диапазон также достигает приблизительно до 4000 Гц. Обратите внимание на сохранность тонкой спектральной структуры вплоть до верхней граничной частоты 3600 Гц в начале фразы (в области 0,2 и 0,5 секунды) и перенос двух высокочастотных фонем /з/ и /с/ (в области 1,2 и 1,9 секунды) в частотный диапазон 2000-3000 Гц.

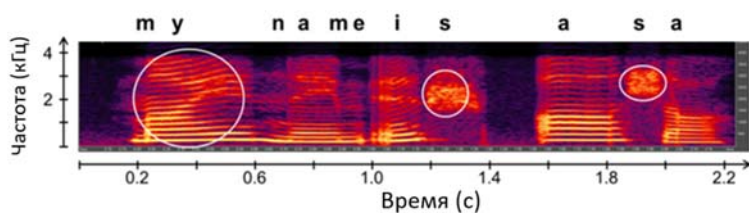


Рис. 3с: Спектрограмма фразы "my name is asa" с SoundRecover2 (нижняя граничная частота 1479 Гц, верхняя граничная частота 3600 Гц, коэффициент компрессии 1,4).

Доказательства эффективности

В табл. 1 приведены теоретические преимущества SoundRecover2 в сравнении с исходным алгоритмом SoundRecover, а именно – расширение диапазона подбора слуховых аппаратов и аудиологические преимущества, проявляющиеся в улучшении слышимости, различения фонем и качества звучания. Кроме того, предполагается, что большинство пользователей безболезненно перейдут на новую технологию.

Расширение диапазона подбора слуховых аппаратов	<ul style="list-style-type: none"> • подходит для большего числа тяжелых/глубоких потерь слуха с приемлемым качеством звучания • большее соответствие левоугольным и круто нисходящим / обрывистым аудиограммам
Улучшенные аудиологические показатели	<ul style="list-style-type: none"> • лучшая слышимость высокочастотных звуков (см. ниже) • лучшее различение, обнаружение и распознавание высокочастотных компонентов, подвергшихся компрессии • сохранение качества звучания, в частности, сохранение привычности и естественности звучания низко- и среднечастотных компонентов • лучшая слышимость окружающих звуков и, как следствие, потенциально лучшее принятие аппаратов и меньшее время привыкания

Табл. 1: Теоретические преимущества SoundRecover2 в сравнении с первоначальной версией SoundRecover.

Результаты исследований

Теоретические преимущества, приведенные в табл. 1, были подтверждены результатами научных исследований. В одной из работ сравнивалась эффективность позднего прототипа SoundRecover2 и классического SoundRecover у 14 детей с тяжелой/глубокой высокочастотной сенсоневральной тугоухостью (Wolfe с соавт. 2016). Было отмечено улучшение распознавания слов в тишине и улучшение распознавания множественного числа английского языка. Не наблюдалось ухудшения обнаружения и распознавания согласных звуков; опытные пользователи исходной версии SoundRecover переходили на SoundRecover2 без длительного периода привыкания.

В другой работе, выполненной в головном офисе Phonak, сравнивали аудиологическую эффективность исходного варианта SoundRecover и SoundRecover2 у 8 взрослых мужчин (средний возраст 56,8 года) с глубокой симметричной сенсоневральной или смешанной тугоухостью (средние пороги слышимости в диапазоне частот 250-8000 Гц выше 90 дБ). Тест восприятия фонем (Schmitt с соавт., 2016), выполненный в этой группе испытуемых, показал значительное улучшение порогов обнаружения для 3 из 4 тестовых стимулов (рис. 4) и значительное улучшение порогов распознавания для 1 из 4 стимулов (рис. 5).

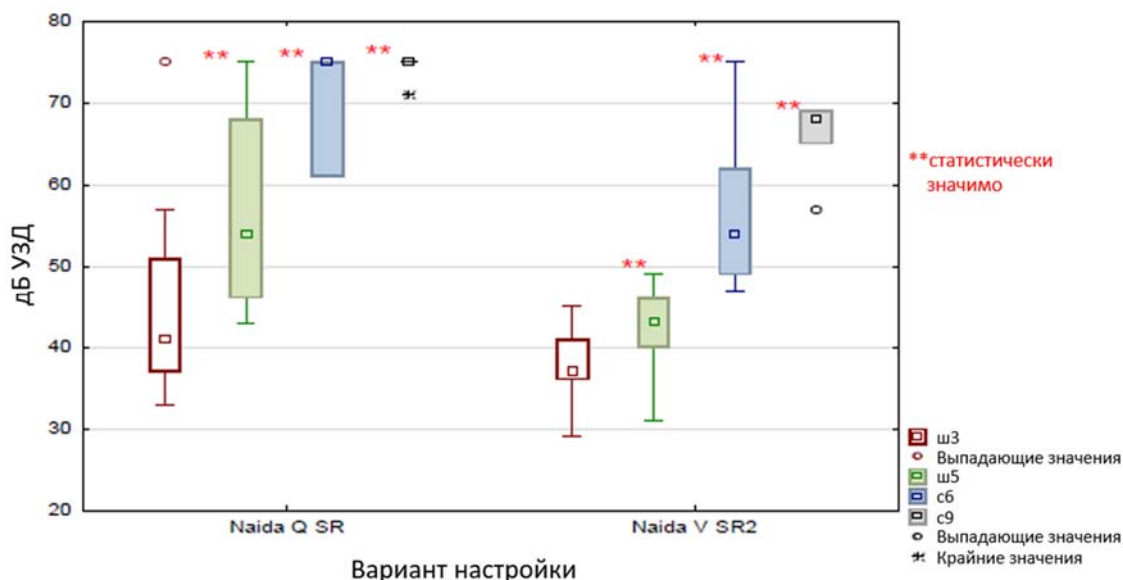


Рис. 4: Тест восприятия фонем – медианные значения порогов обнаружения фонем при глубокой тугоухости для Naida Q SR (исходная версия SoundRecover)³ и Naida V SR2 (SoundRecover2). Пороги обнаружения 3 из 4 тестовых стимулов (sh5, c6, c9) были статистически значимо лучше для SoundRecover2.

³ Если пороги обнаружения или распознавания фонем не удавалось измерить в исходной версии SoundRecover (стимулы c9, asa6 и asa9), использовали условное значение 75 дБ.

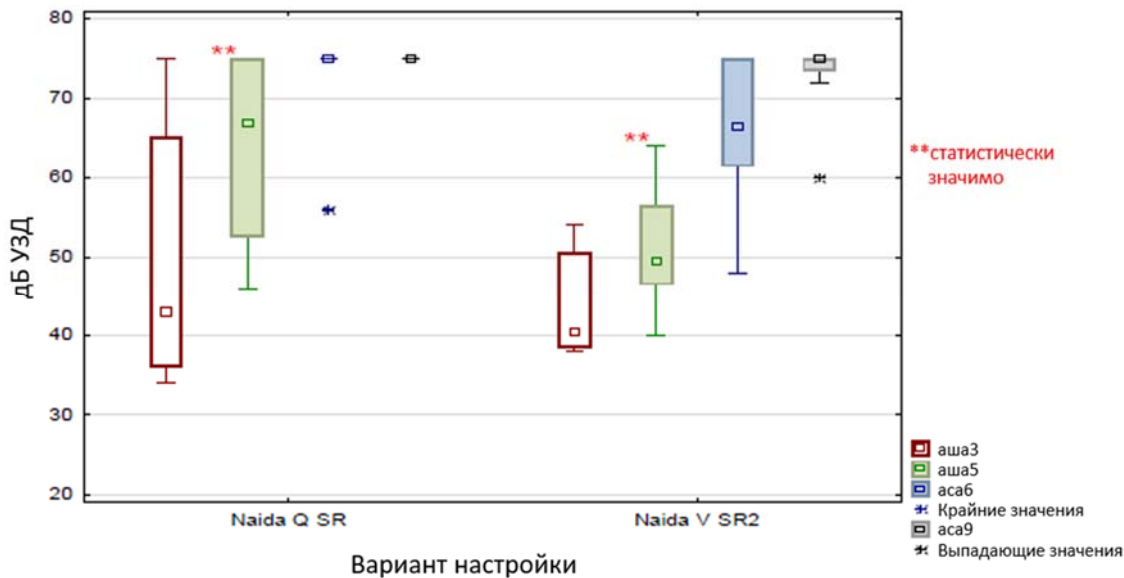


Рис. 5: Тест восприятия фонем – медианные значения порогов распознавания фонем при глубокой тугоухости для Naída Q SR (исходная версия SoundRecover)⁴ и Naída V SR2 (SoundRecover2). Пороги обнаружения 1 из 4 тестовых стимулов (аша5) были статистически значимо лучше для SoundRecover2.

Концепция настройки SoundRecover2

Цель

Согласно многочисленным исследованиям, достижение хорошей слышимости и различимости звуков представляет собой одну из наиболее важных задач коррекции слуха. В то же время, важную роль в спонтанном принятии слуховых аппаратов и комфортном их использовании играет качество звука. Задача SoundRecover2 заключается в сохранении и, при необходимости, восстановлении слышимости и различимости подвергшихся компрессии высокочастотных звуков в сочетании с привычностью звучания во всем частотном диапазоне.

Перцептивные компромиссы при использовании технологий частотного понижения

При использовании любой схемы частотного понижения необходимо учитывать перцептивный компромисс между аудиологической эффективностью и общим качеством звучания. Большинство современных подходов к частотному понижению достаточно успешно справляются с этой задачей при различных степенях высокочастотной тугоухости. Однако при экстремальных вариантах тяжелой/глубокой тугоухости, сопровождающихся отсутствием звуковосприятия на частотах свыше 2000 Гц, применение частотного понижения становится проблематичным. У таких пациентов перенос высокочастотных звуков в ограниченную область остаточного звуковосприятия может сопровождаться снижением качества звучания.

Эта проблема схематически представлена на рис. 6 в виде графика зависимости слышимости и качества звучания от степени частотного понижения.

⁴ Если пороги обнаружения или распознавания фонем не удавалось измерить в исходной версии SoundRecover (стимулы с9, аса6 и аса9), использовали условное значение 75 дБ.

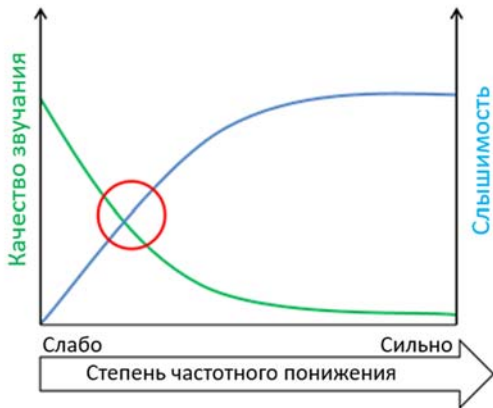


Рис. 6: Кривые перцептивного компромисса между аудиологической эффективностью и качеством звучания при использовании современных технологий частотного понижения при экстремальной тяжелой/глубокой тугоухости. Улучшения слышимости удастся добиться только в ущерб качеству звучания, и наоборот.

SoundRecover2 не только позволяет преодолеть описанные выше ограничения, но и способствует разрешению перцептивных компромиссов.

Основной принцип настройки SoundRecover2

Эффективность методов частотного понижения можно охарактеризовать интуитивным и простым способом, прибегнув к так называемым перцептивным показателям. В частности, подход к настройке SoundRecover2 основан на следующих трех перцептивных показателях:

- **Слышимость** высокочастотных звуков, например, фонем /с/, /ф/ и /ш/
- **Различимость** высокочастотных звуков /с/ и /ш/, подвергшихся частотному понижению
- **Качество звучания** низко- и среднечастотных звуков, например, гласных /а/, /е/, /и/.

Эти три взаимосвязанных показателя можно изобразить графически в виде "компромиссного треугольника". На рис. 7 представлены три возможные конфигурации компромиссного треугольника – настройка по умолчанию, слабая настройка, сильная настройка.

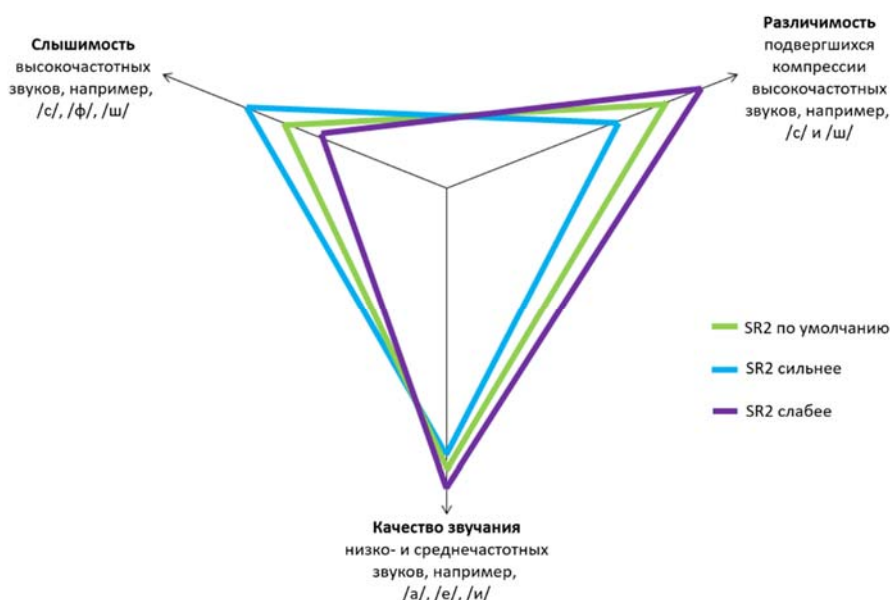


Рис. 7: Компромиссный треугольник SoundRecover2 для настройки по умолчанию (зеленый), настройки с большей слышимостью (синий) и настройки с большей различимостью (фиолетовый). Обратите внимание, как изменение одного из перцептивных показателей влияет на два других показателя.

SoundRecover2 оптимизирует баланс между этими независимыми перцептивными показателями следующим образом:

1) оптимальное использование индивидуального слышимого диапазона

- максимальная выходная частота устанавливается в соответствии с верхней границей слышимого диапазона пользователя для того, чтобы обеспечить максимальную стимуляцию слухового нерва без необходимости частотного понижения
- отсутствие риска депривации

2) оптимальное сохранение средних и низких частот

- верхняя граничная частота выбирается достаточно высокой, чтобы доступная без компрессии речь оставалась неизменной
- отсутствие риска искажения средних и низких частот

3) перемещение подвергшихся компрессии звуков в оптимально выбранную частотную область

- начальная точка компрессии (нижняя граничная частота) устанавливается на самое низкое допустимое значение, что обеспечивает широкую область компрессии с низким коэффициентом компрессии
- повышение силы компрессии для экстремальной тяжелой/глубокой тугоухости, распространяющее эффективность частотного понижения на большее число пользователей.

Предварительные расчеты

С учетом приведенных выше трех принципов и исходя из практических данных, накопленных за несколько лет, был разработан оптимизированный метод предварительного расчета параметров частотной компрессии. В результате удается наилучшим образом сбалансировать три перцептивных показателя, в частности, добиться хорошей слышимости высокочастотных звуков в сочетании с достаточной различимостью подвергшихся компрессии звуков и приемлемым общим качеством звучания.

Процедура настройки SoundRecover2

Точная настройка позволяет при необходимости индивидуально отрегулировать два показателя – слышимость и различимость. Большая слышимость означает снижение нижней граничной частоты, тогда как большая различимость связана с изменением коэффициента компрессии. Третий показатель, качество звучания, изменяется автоматически при каждом вмешательстве в основные параметры настройки. Например, при индивидуальной балансировке слышимости и различимости качество звучания всегда автоматически настраивается на сохранение оптимальной четкости.

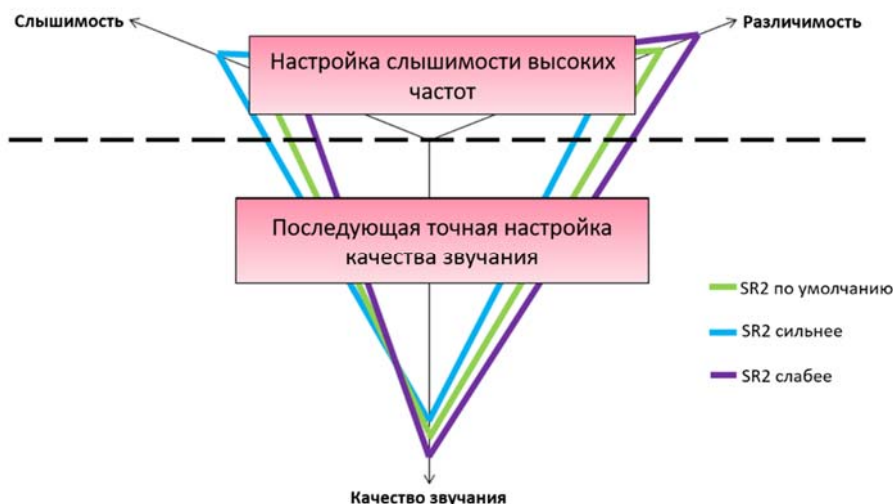


Рис. 8: Процедура настройки SoundRecover2. За основу берется настройка по умолчанию, полученная в результате предварительных расчетов. Дальнейшая точная настройка позволяет оптимизировать слышимость высокочастотных звуков и различимость подвергшихся понижению высокочастотных компонентов. Любое ручное изменение настройки ведет к автоматической оптимизации качества звучания с целью достижения максимальной четкости. Последний параметр можно также отрегулировать вручную, воспользовавшись одним из четырех предустановленных вариантов слухового комфорта.

Качество звучания можно охарактеризовать с позиций четкости и комфортности. Иногда пациенту требуется особое соотношение четкости и комфортности. В таком случае можно дополнительно отрегулировать качество звучания, выбрав один из 4 предустановленных вариантов баланса между четкостью и индивидуальной комфортностью звуковосприятия. Повышение комфортности сопровождается сдвигом верхней граничной частоты в сторону верхнего предела слышимого диапазона.

На рис. 8 представлен процесс точной настройки слышимости и различимости с последующей подстройкой качества звучания. На практике он осуществляется с помощью двух ползунков в окне программы настройки слуховых аппаратов.

Результаты

Описанная выше процедура настройки, основанная на перцептивных показателях, позволяет специалисту отрегулировать SoundRecover2 интуитивно понятным и удобным для пользователя способом. Реакция пациентов на частотное понижение гораздо лучше коррелирует с перцептивными показателями, чем с техническими параметрами или регулировкой "слабее-сильнее", использовавшейся в первоначальном варианте SoundRecover.

Исходная настройка, основанная на предварительных расчетах, является прекрасной отправной точкой, т.к. обеспечивает хорошую слышимость в сочетании с достаточной различимостью подвергшихся компрессии звуков и приемлемым качеством звучания.

Заключение

Новый алгоритм частотного понижения SoundRecover2 специально разработан с учетом использования более низких граничных частот и малых коэффициентов компрессии, что способствует расширению показаний к использованию данной технологии. Поставленная задача была решена путем добавления дополнительной граничной частоты и адаптивной настройки стартовой точки компрессии в соответствии с распределением энергии входного сигнала. Благодаря мгновенному переключению между нижней и верхней граничными частотами высокочастотные компоненты могут быть сжаты в больший частотный диапазон с меньшим коэффициентом компрессии, а низкочастотные компоненты сохраняются неизменными.

Предварительное внешнее исследование продемонстрировало улучшение распознавания слов в тишине и улучшение распознавания множественного числа английского языка без ухудшения распознавания согласных звуков. Опытные пользователи первоначальной версии SoundRecover могли переходить на SoundRecover2 без длительного периода привыкания (Wolfe с соавт., 2016). Тест восприятия фонем, проводившийся в группе людей с глубокой тугоухостью, показал статистически значимое улучшение порогов обнаружения для 3 из 4 тестовых стимулов и статистически значимое улучшение порогов распознавания для 1 из 4 высокочастотных стимулов.

Наряду с новой обработкой сигналов, была создана новая концепция настройки, облегчающая решение компромисса между аудиологическими преимуществами и качеством звука, подвергшегося частотному понижению. Ее можно представить в виде "компромиссного треугольника", иллюстрирующего перцептивные показатели – слышимость, различимость и качество звучания. Предварительная настройка является оптимальной стартовой точкой, обеспечивающей хорошую слышимость высокочастотных звуков, достаточную различимость подвергшихся компрессии звуков и предлагающей приемлемое общее качество звучания. Точная настройка в соответствии с индивидуальными потребностями пользователя легко выполняется посредством ползунков в экране программы настройки Target.

Литература

McDermott, H. (2010). SoundRecover - The importance of wide perceptual bandwidth. Phonak Background Story.

Wolfe, J., Duke, M., Schafer, E., Rehmann, J., Jha, S., John, A., Jones, C. (2016). Preliminary evaluation of a novel non-linear frequency compression scheme for use in children. Submitted to International Journal of Audiology.

Schmitt, N., Winkler, A., Boretzki, M., Holube, I. (2016). A phoneme perception test method for high frequency hearing aid fitting. Journal of the American Academy of Audiology.

Авторы

Julia Rehmman: инженер-аудиолог в головном офисе компании Sonova в Швейцарии.

Siddhartha Jha: инженер-программист в научно-техническом отделе головного офиса компании Sonova в Швейцарии.

Silvia Allegro Baumann: старший инженер-программист в научно-техническом отделе головного офиса компании Sonova в Швейцарии.