



$$q_i l^{n-1} = \frac{Q r_p^{n+1}}{n(|R_i - R_g| + r_p^2)^2} \quad (2)$$

Полученная формула дает возможность улучшить метод жадного продвижения. Есть только одно исключение. Это случай, когда радиус вектор конечной точки попадет в одну из пустот. В таком случае, описывающая окружность помимо пустоты должна учитывать и соседние узлы из-за сложных выступов границ пустоты. В данной ситуации описать мы не сможем описать пустоту одним зарядом, а должны разбить пустоту на две или более части. Так чтобы точка назначения оказалась вне соответствующих окружностей.

Литература

1. D. Meyer, L. Zhang, and K. Fall, editors. RFC4984. The Internet Architecture Board, 2007
2. Morteza M. Z. A Survey on Centralised and Distributed Clustering Routing Algorithms for WSNs, 2015
3. Соколов М.А. Программно-аппаратное обеспечение беспроводных сетей на основе технологии ZigBee/802.15.4 // Электронные компоненты. 2004. №12. С. 80-87
4. Bachrach, J., and Taylor, C. Localization in sensor networks. Ch. 9, Handbook of Sensor Networks. Stojmenovic (Editor), John Wiley 2005.
5. B. Karp and H. T. Kung., "Greedy perimeter stateless routing (GPSR) for wireless networks," Proc. 6th annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2000, pp. 243–254.
6. Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces," IEEE INFOCOM, 2003 – ВПК и правила обхода дыр
7. Shannon C. E. A mathematical theory of communication //ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. – 2001. – Т. 5. – №. 1. – С. 3-55.

К.В. Павлов, И.А. Стефанова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРОГА СЛЫШИМОСТИ ПРИ МАСКИРОВКЕ СЛУХА

(Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики)

На современном этапе развития нашего общества пользователем доступны носители большого объема информации и высокоскоростные каналы передачи данных. Однако наблюдается постоянный рост объемов передаваемой информации. Поэтому задача оптимального сжатия аудиоданных остается актуальной, и по сей день.

Различают сжатие без потерь (*lossless*), позволяющее восстановить исходный сигнал в полном объеме и сжатие с частичными потерями (*lossy*), при котором полное восстановление исходного сигнала уже невозможно.



Сжатие без потерь основано на принципе сокращения статистической избыточности, то есть более рационального размещения данных в файле, что позволяет уменьшить его размер. Однако даже при использовании достаточно сложных процедур обработки устранение статистической избыточности звуковых сигналов позволяет в конечном итоге уменьшить требуемую пропускную способность канала связи лишь на 15–25% по сравнению с ее исходной величиной.

Сжатие с потерями разработано на основании алгоритмов сокращения психоакустической избыточности, то есть удаления из файла звуковой информации, незначительно влияющей на восприятие звука человеческим ухом. Этими методами можно обеспечить сжатие цифровых аудиоданных в 10 – 12 раз без существенных потерь в качестве воспроизведения информации.

Значимое явление для сжатия звуковых сигналов, известное из исследований слуха человека, состоит в том, что звук не может быть воспринят человеческим слухом, если этот звук маскируется другим, более громким звуком, расположенным вблизи него на оси частот [1].

Анализируя спектр сигнала и принимая во внимание семейство кривых маскировки можно рассчитать границу маскирования того или иного участка спектра и выбрать требуемое число разрядов для кодирования спектральных компонентов этого участка.

Существующие в настоящее время форматы сжатых звуковых файлов [3] учитывающие психоакустическую избыточность, например *MPEG*, *Dolby AC-3*, используют упрощенное аналитическое описание кривой маскировки. Его не полное соответствие экспериментальным данным не позволяет обеспечить оптимального сжатия.

Для того, чтобы можно было определить степень сжатия с устранением психоакустической избыточности найдем аналитическое описание кривых маскировки. Кривые для математического моделирования будем брать из источника [1].

С помощью, полученных функций в дальнейшем можно будет собрать модель процесса устранения избыточных частотных компонент и определить, какие составляющие можно убрать из спектра исходного сигнала, без ухудшения качества восприятия звука.

Для аппроксимации кривых будем использовать линейную регрессию общего вида [2]. В этом случае заданная совокупность точек приближается функцией вида:

$$F(x, K1, K2, \dots, Kn) = K1 * F1(x) + K2 * F2(x) + \dots + Kn * Fn(x).$$

Таким образом, функция регрессии является линейной комбинацией функций $F1(x), F2(x), \dots, Fn(x)$ с соответствующими коэффициентами $K1 \dots Kn$.

При этом критерием точности соответствия функции к экспериментальным данным является коэффициент детерминации R^2 . Причем, чем ближе этот коэффициент к 1, тем точнее приближение:



$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{F}_i - \bar{F}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (F_i - \bar{F}_i)^2} \quad (2)$$

где m – общее число исследуемых точек данных;

\hat{F}_i и F_i – соответственно, расчётное и экспериментальное значения данных;

\bar{F}_i – усреднённое по m значению экспериментальных данных.

Авторами в работе [1] были проведены исследования с группой студентов и получены экспериментальные кривые порогов слышимости при воздействии на слух узкополосного шума со средней частотой 1 кГц с различными уровнями интенсивности. Все кривые маскировки не симметричны и имеют явно выраженный максимум на средней частоте полосы шума. Приведем кривые маскировки к единому максимуму, переместив их параллельно самим себе на величину a_m , а затем совместим эти кривые, проградуировав ось абсцисс в относительных частотах:

$$F = \frac{f - fm}{\Delta F}, \quad (3)$$

где f – текущая частота, ΔF – ширина частотной группы, образованная f_m – частотой тона.

В итоге, кривые маскировки практически совпали, что привело к упрощению нахождения искомой функции кривой маскировки для любого тона.

Эта особенность позволила с высокой степенью точности ($R^2 = 0,997$) получить аналитическую зависимость:

$$L(F) = -1.085 \cdot F^2 + 33.923 \cdot \frac{1}{F^2 + 1} + 4.026 \cdot F + 1.715 \cdot \sin(F) + L(f_m) + a_m(f_m), \quad (4)$$

Кривая аппроксимирующей функции $L(F)$ при $L_m = 60$ дБ показана на рис. 1 сплошной линией. Видно хорошее совпадение по форме $L(F)$ с экспериментальными данными, представленными точками на графике.

В полученной зависимости (4) a_m – коэффициент маскировки частотной группы, компенсирующий смещение кривой маскировки тона, был получен эмпирически [4] и путем регрессионного анализа получено его аналитическое выражение:

$$a_m = -2.033 \cdot 10^{-12} \cdot f^3 + 7.12 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 - 8.951 \cdot 10^{-4} \cdot f - 2.069$$

Как можно увидеть по графику (рис. 1), полученные результаты весьма точно ($R^2 \rightarrow 1$) описывают экспериментальную зависимость.

Проверить полученные результаты и эффективность сжатия с использованием свойства маскировки можно путем моделирования этого процесса. Для этого в пакете расширения Simulink системы MATLAB была создана модель порога слышимости при маскировке. Модель частотной избирательности для музыкального сигнала приведена на рис. 2.

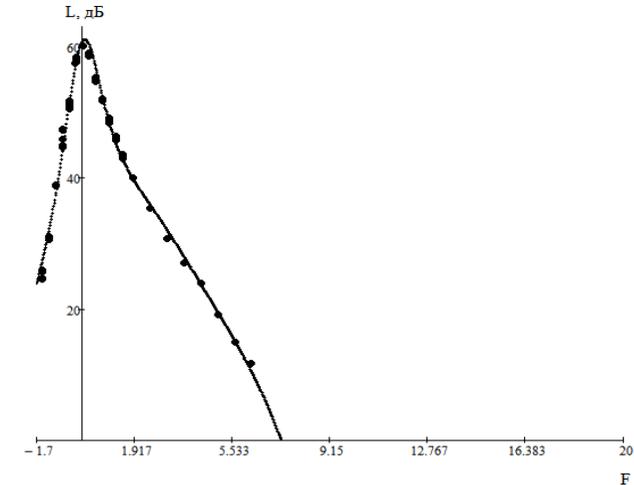


Рис. 1. Аппроксимирующая кривая маскировки

Модель содержит стандартные блоки из обширной библиотеки *Simulink*, а так же создан собственный блок *Mask* с технологией применения S-функций.

Блок *From Wave File* последовательно считывает выборки цифровых аудиоданных длиной N из файла *Oboe_melodious_phrase_Stereo.wav*.

Над каждой выборкой временных отсчетов блок *FFT* выполняет прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для получения частотных составляющих спектра звукового сигнала. В результате на выходе этого блока формируется массив из N коэффициентов преобразования Фурье в виде комплексных чисел типа $a_n + ib_n$ с разрешением по частоте $\Delta f = F_n / N$.

Для формирования линейчатого спектра используется блок *Complex to Magnitude-Angle*, выделяющий для каждого коэффициента ДПФ модуль $|u| = (a_n^2 + b_n^2)^{0.5}$ и фазу $\angle u = \arctg(-b_n/a_n)$. Поскольку работа с фазой комплексной величины в данной работе не рассматривается, она непосредственно подается на соответствующий вход блока *Magnitude-Angle to Complex*, формирующего комплексную величину на приеме.

Блок *IFFT* выполняют обратное ДПФ. На его выходе остается нулевая мнимая часть. Для ее устранения используется блок *Complex to Real-Image*.

Выходной блок *To Wave File* накапливает полученные временные выборки в виде звукового *mask.wav* файла, который в дальнейшем воспроизводится звуковой платой ЭВМ.

Блок MASK работает под управлением программы, оформленной в виде *m*-файла, по алгоритму обнуления отдельных отсчетов, лежащих ниже кривой маскировки локально маскирующей компоненты. Если кривая маскировки локально маскирующей компоненты превышает уровень рассматриваемой маскируемой компоненты, эта компонента считается маскирующей.

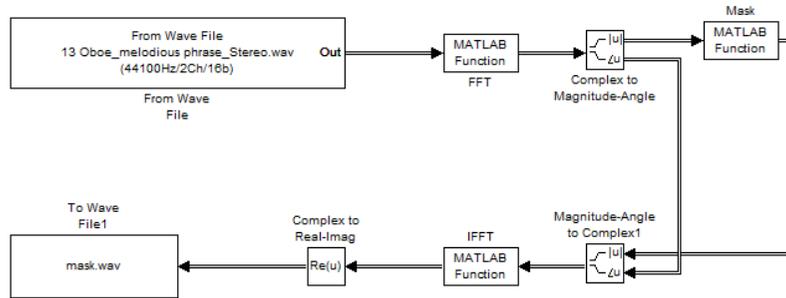


Рис. 2. Моделирование частотной избирательности слуха

В результате выходом алгоритма является массив коэффициентов ДПФ той же размерности, что и входной, но с некоторыми обнуленными коэффициентами.

В процессе эксперимента использовались 2 тестовых звуковых файла с музыкальным и речевым фрагментами, а также 3 человека, прослушивающие исходные файлы и файлы, прошедшие цифровую обработку в модели.

Результат моделирования с использованием свойства частотной избирательности человека показал, что 25 % спектральных составляющих аудиоданных при их сжатии можно удалить. При этом ухудшения качественного восприятия обработанных программой тестовых аудиоданных не наблюдалось.

Литература

1. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации / пер. с немец, под ред. Б. Г. Белкин. М.: Связь, 1971 – 255 с.
2. Воскобойников Ю. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad. М: Лань, 2011 – 224 с.
3. Ковалгин Ю. А., Вологдин Э. И. Цифровое кодирование звуковых сигналов.–СПб.: КОРОНА-принт, 2004–240 с., ил.
4. Стефанова И. А., Павлов К.В. Моделирование свойств слухового анализатора. Уфа: Международный центр инновационных исследований «Символ науки» № 11, часть 1, 2015 – 58-62 с.

А.В. Папе, И.А. Стефанова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ В SIMULINK

(Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики)

Современная математическая система *MATLAB* в комплексе с пакетом расширения *Simulink* обладает огромным количеством различных библиотек, позволяющих проводить как сложные математические вычисления, так и моде-



лировать работу любого сколь угодно сложного технического устройства. Базируясь на принципах визуально-ориентированного программирования, *Simulink* позволяет выполнять моделирование сложных устройств с высокой степенью достоверности и обладает наглядными средствами представления результатов. Это позволяет пользователям разработать новые устройства, понять работу уже созданных систем, просчитать характеристики тех или иных блоков системы, представить наглядно их работу и результаты этой работы. Все это существенно упрощает процесс обучения студентов.

Однако зачастую схемы, создаваемые на базе простейших блоков из библиотек *Simulink*, получаются объемными, размытыми по рабочей области окна моделирования, имеют большое количество переплетающихся между собой соединений. Всё это значительно затрудняет процесс изучения схемы и её работы, мешает в целом восприятию изучаемого объекта моделирования. Чтобы избежать данной проблемы можно использовать приём, про который часто забывают пользователи *Simulink* – создание и маскирование подсистем.

Подсистема – это фрагмент *Simulink*-модели, оформленный в виде отдельного функционального блока. Использование подсистем при составлении моделей имеет следующие положительные стороны:

- уменьшение количества одновременно отображаемых блоков на экране, что облегчает восприятие модели (в идеале модель полностью должна отображаться на экране монитора);
- создание и отладку фрагментов модели по отдельности, что повышает технологичность создания модели;
- создание собственных библиотек;
- возможность синхронизации параллельно работающих подсистем;
- включение в модель собственные справочные средства;
- возможность связывания подсистемы с каким-либо m-файлом системы *MATLAB*, обеспечивая запуск этого файла при открытии подсистемы (нестандартное открытие подсистемы).

Использование подсистем и механизма их соединения в единый блок позволяет создавать блоки, не уступающие стандартным по своему оформлению (собственное окно параметров блока, пиктограмма, справка и т.п.). Этот процесс представляет собой маскирование систем [1].

Количество подсистем в модели не ограничено, кроме того подсистемы могут включать в себя другие вложенные подсистемы. Уровень вложенности подсистем друг в друга также не ограничен.

Связь подсистемы с моделью (или подсистемой верхнего уровня иерархии) выполняется с помощью входных (блок *Inport* библиотеки *Sources*) и выходных (блок *Outport* библиотеки *Sinks*) портов. Добавление в подсистему входного или выходного порта приводит к появлению на изображении подсистемы метки порта, с помощью которой внешние сигналы передаются внутрь подсистемы или выводятся в основную модель. При моделировании подсистем в *Simulink* имеется возможность переименования блоков *Inport* или *Outport* со стандартных названий *In / Out* на те, которые нужны пользователю.