

## **Синтез квазипериодических сверхширокополосных сигналов в частотной области**

Н.С. Семенов, Л.А. Белов

*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»  
Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; E-mail: [semenov\\_nick@mail.ru](mailto:semenov_nick@mail.ru)*

*В работе проведено исследование квазипериодических сверхширокополосных КСШ сигналов в виде оцифрованных примеров звучания музыкальных инструментов. Предложен метод синтеза подобных сигналов спектральной области по полученным в ходе эксперимента аппроксимированным кривым изменения гармонических составляющих спектра, показано, что предложенный метод позволяет существенно сократить объемы используемой при синтезе памяти по сравнению с популярными на данный момент методами. Предложена методика объективной оценки качества синтеза.*

*This work is dedicated to quasiperiodic wideband signals (QWS) such as digitized samples of musical instruments are research. In this work spectral synthesis method of QWS is suggested. It based on approximated experimental curves of harmonic components deviations. This work shows that suggested method allows considerably reduce memory usage in comparison with popular methods such as sample based synthesis. Method of synthesis quality impartial assessment is suggested.*

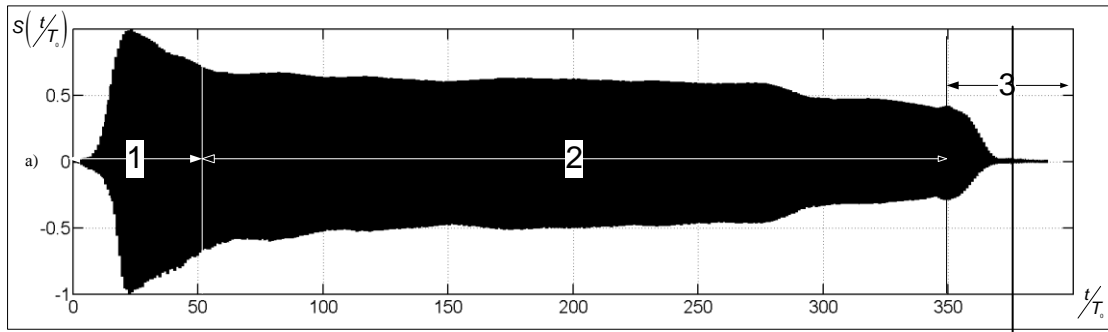
В акустических колебательных системах с конечными размерами и малыми потерями (объемный резонатор, струна и др.) после импульсного воздействия возникают колебания, связанные с появлением отражений и резонансных явлений. В силу наличия многомодовости резонансных структур в отклике данных систем будет присутствовать множество гармонических составляющих, а ширина полного спектра подобных откликов, как правило, превышает несколько октав по отношению к частоте основной моды, а во многих системах достигает нескольких декад. При этом свободное затухание энергии каждой из мод происходит за сотни и тысячи периодов основной частоты этой моды. Поэтому такие колебания являются квазипериодическими и сверхширокополосными (КСШ) сигналами. Синтезаторы подобных музыкальных сигналов строятся обычно [1] на основе загружаемых в память исходных сэмплов звучания натуральных инструментов, что требует значительных ресурсов памяти и производительности сигнального процессора.

**Целью** работы является разработка оптимального с точки зрения использования вычислительных ресурсов и памяти алгоритма работы цифрового синтезатора КСШ сигналов, в соответствии с которым в режиме предварительного обучения создаётся банк параметров каждого из подклассов КСШП сигналов, а в рабочем режиме синтезируются такие сигналы с заданной точностью при различном сочетании параметров.

### **Параметрическая модель сигнала в спектральной области**

Примерами КСШ сигналов могут служить отклики акустических и электронных резонаторов, звуки музыкальных инструментов, реверберационные отклики закрытых помещений и др. Характерная осциллограмма такого вида сигналов представлена на рис. 1.

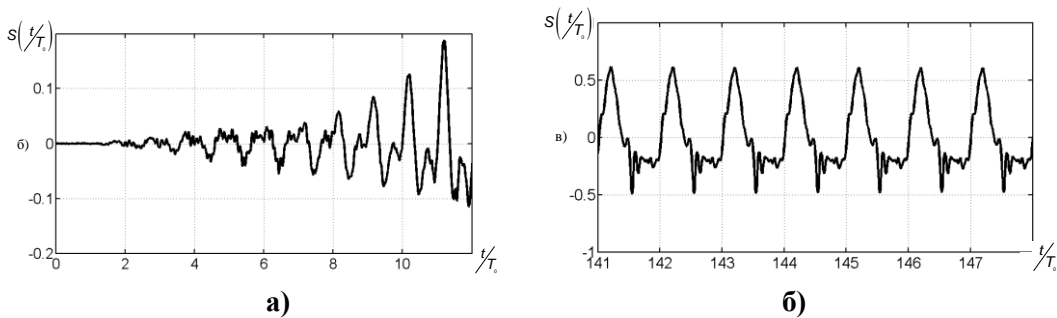
Как можно видеть из рис. 1, в огибающей сигнала выделяются характерные временные области: 1 – атака, 2 – пьедестал, 3 – затухание.



**Рис. 1. Типовая форма огибающей сигнала звучания саксофона: 1 – область атаки; 2 – область пьедестала; 3 – область затухания**

Области атаки и затухания являются переходным процессом в колебательной системе, область пьедестала – режимом устойчивых колебаний (существует при подводе дополнительной энергии в систему).

Детальное рассмотрение формы несущего колебания КСШ сигнала на отрезках времени порядка нескольких квазипериодов  $T_0$ , представленное на рис. 2, показывает его резко несинусоидальную форму и изменение её от одного квазипериода к другому в области атаки.



**Рис. 2. Форма сигнала звучания саксофона на протяжении нескольких квазипериодов  $T_0$  в области атаки (а) и пьедестала (б)**

Для сигналов с изменяющейся огибающей и квазипериодической формой несущего колебания несинусоидальной формы представляется адекватным инструментом использование скользящего преобразования Фурье [2] с оконной функцией, в пределах которой форма сигнала меняется незначительно. Именно такой подход реализован ниже.

Для обеспечения требуемой высокой точности синтеза КСШ сигнала в частотной области используется двумерное дискретное оконное быстрое преобразование Фурье – Оконное БПФ [3].

Задача выбора оконной функции сводится к нахождению компромисса между разрешением по частоте и разрешением по амплитуде. Приоритет в выборе вида оконной функции падает на амплитудные характеристики. В [3] сопоставлены свойства различных оконных функций. Наименьшим уровнем боковых лепестков (до -92 дБ) обладает окно Блэкмана-Харриса. Снижение разрешающей способности по частоте для окна такого вида в данной задаче не существенно, так как не ставится задача разделения сигналов близких частот.

Размер кадра и скользящего окна выбирается из соображений получения достаточно большого количества спектральных отсчетов на единицу частотной полосы в 1 герц, реализации требуемой скорости вычислений в полученного в пределах окна массива данных. При размере кадра в 2048 отсчетов было получено

разрешение по частоте 21,53 Гц при частоте дискретизации 44 100 Гц. Это позволяет различать максимальные значения для нескольких десятков гармоник в слышимом диапазоне звуковых частот. Для увеличения количества траекторных точек в единицу времени используем наложение кадров. В работе выбрана последовательность кадров через каждые 100 отсчетов, что даёт скорость обработки около 441 точки за секунду и позволяет с достаточной точностью подобрать аппроксимирующую функцию.

### **КСШ сигналы как суперпозиция узкополосных процессов**

Представим КСШ сигнал  $s(t)$  в виде суперпозиции  $n$  узкополосных процессов, центральные частоты которых состоят между собой в целочисленных соотношениях. Это позволяет представить их математическую модель в форме медленно меняющихся функций времени:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \cos[2\pi n f_0 t + \varphi_n(t)] \quad (1)$$

где  $A_n(t)$  - временная функция изменения амплитуды гармоники;

$\varphi_n(t)$  - временная функция изменения фазы гармоники.

Форма (1) записи КСШ сигнала дает возможность восстановления исходного сигнала, зная лишь законы изменения параметров гармоник. Как правило, в исследуемых сигналах, количество гармоник ограничено величиной порядка 30-50. Данное ограничение объясняется разрешающей способностью анализирующего или принимающего устройства по амплитуде. Для анализатора – это величина шумов дискретизации, для принимающего – порог слышимости.

Для восстановления исходного сигнала достаточно знать законы изменения данных параметров. Поэтому достаточно медленное относительно периода основной частоты изменение данных функций дает возможность в сотни раз уменьшить частоту дискретизации при хранении информации о сигнале [4]. Поясним данное заключение следующей цепочкой вычислений.

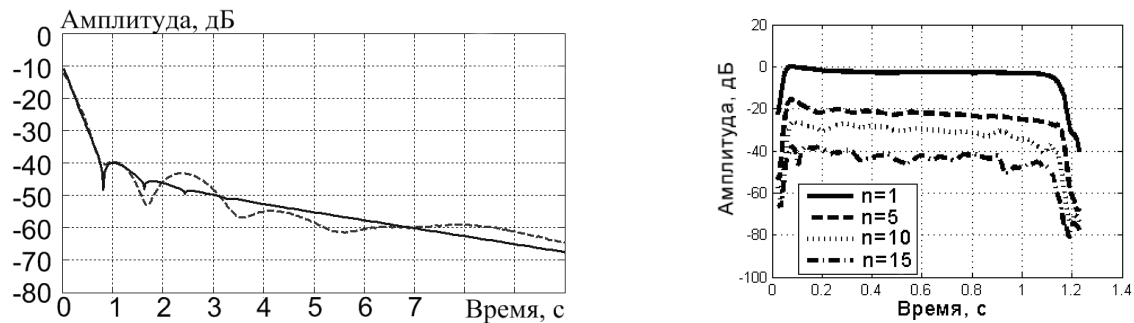
Пусть сигнал с частотой основного тона в 220 Гц имеет 50 гармоник. Таким образом высшая частота в спектре сигнала равна 11 кГц. Для оцифровки данного сигнала потребуется в соответствии с теоремой В.А. Котельникова частота дискретизации минимум 22 кГц. При разрешении по амплитуде 16 бит и длительности сигнала в 2 секунды имеем 688 кБ данных.

Теперь представим данный сигнал через набор параметров  $A_n(t)$  и  $\varphi_n(t)$ . С учётом количества гармоник  $n = 50$  получаем 100 слоев данных об изменениях во времени параметров для данного КСШ сигнала. Примем, что параметры изменяются в 20 раз медленнее, чем период частоты основного тона, так что наивысшая частота в спектре функций изменения параметров составляет 11 Гц. Для оцифровки каждой функции необходима минимальная частота дискретизации 22 Гц. Таким образом, для 100 слоев функций изменений параметров при том же разрешении по амплитуде потребуется 68,8 кБ информации. Из представленного примера следует, что выигрыш в объеме памяти данных достигает 10 раз.

### **Зависимости временных параметров от частоты основного тона**

Исследования временных параметров огибающих производились для заранее полученных с помощью эталонного микрофона массивов отсчётов звучания фортепиано и саксофона.

Типовая зависимость от времени амплитуд гармоник КСШ сигнала звучания фортепиано и саксофона представлена на рис. 3.



а) **Рис. 3. Изменение во времени амплитуд гармоник КСШ сигнала для звучания: а - фортепиано (реальная – пунктир, аппроксимированная - сплошная); б - саксофона (показаны 5 гармоник)**

Анализ графиков на рис. 3 показал, что, что законы изменения амплитуд всех гармоник во времени имеют высокую корреляцию. Использована аппроксимация спектральных траекторий экспоненциальной и степенной функциями. Поиск параметров аппроксимации произведён в работе по методу наименьших квадратов. Итоговая модель для синтеза КСШ сигнала представляет собой набор коэффициентов аппроксимирующей функции и, собственно, саму функцию для каждой из  $n$  гармоник.

Переход к аппроксимирующим функциям позволяет в несколько десятков раз уменьшить суммарный объем вычислительных ресурсов. Если без аппроксимации для сигнала длительностью в 2 секунды требовался объем в 68,8 кБ, то при условии, что для каждого слоя используется не более восьми параметров аппроксимирующей функции (итого 800 значений параметров) при выделении 32 битов памяти для каждого коэффициента модель сигнала занимает около 1,5 кБ, что практически в 50 раз меньше объема, используемого без аппроксимации, и в 500 раз меньше без применения предложенных методов синтеза. Существенным преимуществом модели является тот факт, что восстановление (синтез) сигнала может производиться с любой точностью и частотой дискретизации, поскольку точность вычисления значения функций ограничена лишь вычислительной мощностью процессора.

Синтез производился суммированием парциальных сигналов по каждой из гармоник согласно восстановленным функциям. Для уменьшения пик-фактора начальные фазы были выбраны по случайному закону с равномерной функцией распределения.

### Оценка качества синтеза

Для данного вида КСШ сигналов, а также и для оценки качества музыкальных фонограмм и речевых сигналов в настоящее время используются методы субъективно-статистических испытаний [5, 6] или объективные методы оценки качества, реализуемые с помощью сравнения синтезированного и исходного сигналов.

Субъективно-статистические методы включают в себя множество субъективных факторов (возраст и натренированность слуха участников экспертной группы слушателей, условия прослушивания и др.).

Среди объективных методов известны психоакустические или перцепционные [7], а также математический метод корреляции. В основе психоакустического метода лежит сравнение реакции модели восприятия для исходного и синтезированного сигналов.

Корреляционный метод, может применяться как к временному представлению сигнала, так и для спектральному. Процесс его подразумевает вычисления коэффициента взаимной корреляции для исходного и синтезированного сигналов, либо для его кадров.

### **Корреляционный метод оценки качества синтеза**

В работе объективная оценка качества синтеза производилась по взаимным корреляционным функциям [8] исходного и синтезированного сигналов для огибающих и отрезков звучания с примерно постоянной мгновенной мощностью. Для восприятия тембра человеком важны характеристики сигнала в установившемся режиме (область пьедестала) и в области появления колебаний (область атаки). Корреляционные функции вычислялись для фрагментов сигнала длиной в 5-6 периодов основной частоты из этих областей. Точность считалась достаточной, если максимальные значения нормированных корреляционных функций находилось в диапазоне от 0,85 до 1. Следует отметить, что получены высокие, не ниже 0,87, значения коэффициентов корреляции между исследуемым и синтезируемыми сигналами при статистической обработке множества значений основной частоты и сочетаний параметров КСШ сигналов.

### **Выводы**

Синтезаторы КСШ сигналов могут найти применение в области синтеза музыкальных звуков, при моделировании откликов сложных резонансных структур, для нахождения резонансных мод резонаторов благодаря значительной экономии вычислительных ресурсов, увеличению скорости обработки массивов данных. Структуры, подобные предложенной и применённой в данном частотном синтезаторе КСШ сигналов, могут быть применены при анализе реверберационных свойств помещений, а также других приложениях.

Неисследованными на данный момент остаются возможные зависимости параметров модели для различных частот основного тона, а также предполагается расширение банка моделей для других музыкальных инструментов, а также других колебательных систем.

### **Литература**

1. Julius O. Smith III, "Physical Audio Signal Processing", by, W3K Publishing, 2010.
2. Залманзон Л.А. - Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989, - 496 с.
3. Harris, F.G. – Of the use of windows for harmonic analysis with discrete Fourier transform, Proc. IEEE, 66, 1978, pp.51-83
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов.— 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1986. — С.106-109.
5. Рекомендации МСЭ - R BS.1116 «Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems».
6. Рекомендации МСЭ - R BS.1284 «General methods for the subjective assessment of sound quality».
7. Рекомендации МСЭ - R BS.1284 «Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs».
8. Гмурман В.Е. - Теория вероятностей и математическая статистика – М.: Высшая школа, 2003.