

Министерство образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации
(РЗИ)

Исследование спектрального состава фонограмм

Руководство к лабораторной работе по дисциплине
«Электроакустические устройства»

Разработчик

Студент гр.146-1

_____ В.П.Сорокин

Редактор

Доцент, к.т.н.

_____ Э.В.Семенов

2000

Содержание

1	Цель работы.	3
2	Основные параметры сигналов звукового вещания.	3
2.1	Мощность сигналов звукового вещания	3
2.2	Спектральная плотность мощности.	4
2.3	Динамический диапазон и средняя мощность сигналов звукового вещания	6
3	Естественные источники звука, параметры, виды.	7
4	Дискретное прямое преобразование Фурье	10
5	Экспериментальное задание.	11
6	Указания по проведению экспериментального исследования.	12
	Контрольные вопросы	13
	Список использованных источников	14
	Приложение А. Выбор варианта.	15

1 Цель работы

Исследование спектрального состава сигналов:

- а) чистых тонов;
- б) речи;
- в) музыкальных инструментов;
- г) различных жанров музыки.

2 Основные параметры сигналов звукового вещания

2.1 Мощность сигналов звукового вещания

Если $u(\xi)$ представляет собой изменение во времени мгновенных значений напряжения сигнала звукового вещания (СЗВ), то его текущая мощность

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-\xi}{T}\right) u^2(\xi) d\xi, \quad (2.1)$$

где $(1/T)\exp(\dots)$ – весовая функция, приписывающая более ранним значениям сигнала тем меньший относительный вес, чем дальше они удалены в прошлое, равная 0 при $\xi > t$, T – длительность «памяти»; t – текущее время.

Очевидно, что если $P(t)$ – случайная функция, то можно говорить о плотности вероятности $W(P)$ распределения текущей мощности во времени.

Хорошей аппроксимацией закона распределения значений текущей мощности во времени являются выражения [1, с.44]:

для речевых сигналов

$$W(P) = 0.39 \exp(-P/\bar{P}) - 0.25 \exp(-5.7P/\bar{P}); \quad (2.2a)$$

для музыкальных сигналов

$$W(P) = 0.24 \exp(-P/\bar{P}) - 0.17 \exp(-4P/\bar{P}). \quad (2.2б)$$

Эти зависимости соответствуют экспериментальным данным, усредненным по множеству реализаций (выборок) отдельно для речевых (пять отрывков) и музыкальных (свыше 30 отрывков разных типов программ) отрывков СЗВ. Величина \bar{P} представляет собой среднее значение текущей мощности и найдена как математическое ожидание случайной величины P (множество значений $P(t)$).

Для большинства жанров СЗВ наиболее вероятные значения текущей мощности лежат на 3 дБ ниже долговременной средней мощности \bar{P} (исключение составляет звучание эстрадной музыки и хора с оркестром). Поэтому при предварительной установке регуляторов уровня следует ориентироваться на значение \bar{P} .

Уровень среднeminутной мощности определяется отношением

$$N_{\text{ср.мин}} = 10 \lg(P_{\text{ср.мин}}/P) = 10 \lg(U_{\text{ср.мин}}^2/U_{\text{sin}}^2), \quad (2.3)$$

где U_{sin} – эффективное значение синусоидального напряжения (обычно частотой 1 кГц), равное квазимаксимальному значению $U_{\text{кв.макс}}$ (вероятность его превышения в течение всего времени анализа составляет 0.02); $U_{\text{ср.мин}}$ – среднее значение напряжения за время анализа (интервал наблюдения $T_{\text{ин}}$), равное 1 мин.

Усреднение (по множеству), характеризующее передачу за сутки, выполненное с учетом встречаемости программ разного жанра, может считаться идентичным (по результатам) усреднению за длительное время.

Функции распределения уровней среднeminутной мощности $P(N_{\text{ср.мин}})$ для сигналов программ звукового вещания аппроксимируются с достаточной для практики точностью законом Рэлея [1, с.46]:

$$P(N_{\text{ср.мин}}) = 1 - \exp(-N_{\text{ср.мин}}^2/2\alpha^2), \quad (2.4)$$

где α – параметр закона распределения.

Уровнем долговременной средней мощности называется выраженное в децибеллах отношение мощности СЗВ, полученной в результате усреднения всех ее значений (например, $N_{\text{ср.мин}}$) за все время передачи данной программы в течение суток, к квази-максимальному значению.

2.2 Спектральная плотность мощности

Если отрывок СЗВ пропустить через набор полосовых фильтров, охватывающих весь диапазон слышимых частот, то можно измерить для него плотности вероятности текущей мощности $W_i(P_i)$ как в выделенных узких полосах ΔF_i , так и в широкой (полной) ΔF полосе $W(P)$.

Имея совокупность таких экспериментальных зависимостей $W_1(P_1)$, $W_2(P_2)$... $W_n(P_n)$ и $W(P)$, можно определить значения текущей мощности P_1 , P_2 ... P_n , P , вероятность превышения которых составляет наперед заданное значение. Если последнее принять равным 0.02, то полученная совокупность значений

$$N_i = 10 \lg(P_i/P) \quad (2.5)$$

будет представлять собой распределение максимальных уровней текущей мощности для совокупности выделенных полос. Если же значение вероятности принять равным 0.5, то получим распределение средних значений уровней текущей мощности исследуемого отрывка СЗВ.

Если найденные значения N_i отнести к ширине выделенной полосы частот ΔF_i , а далее, взять отношение

$$N_i' = 10 \lg \left(\frac{\Delta F_i P_i}{\Delta F_i P} \right), \quad (2.6)$$

то определим уровень спектральной плотности максимальной (средней) мощности или распределение соответствующих уровней (максимальных, средних), по частоте для исследуемого отрывка СЗВ.

Для многих звучаний уровень спектральной плотности средней мощности, кроме речи, может иметь значения к максимальным вплоть до самых нижних частот, в то время как для всех типов СЗВ он существенно понижается на частотах, превышающих 500...1000 Гц и тем значительнее, чем выше частота [1, с.47].

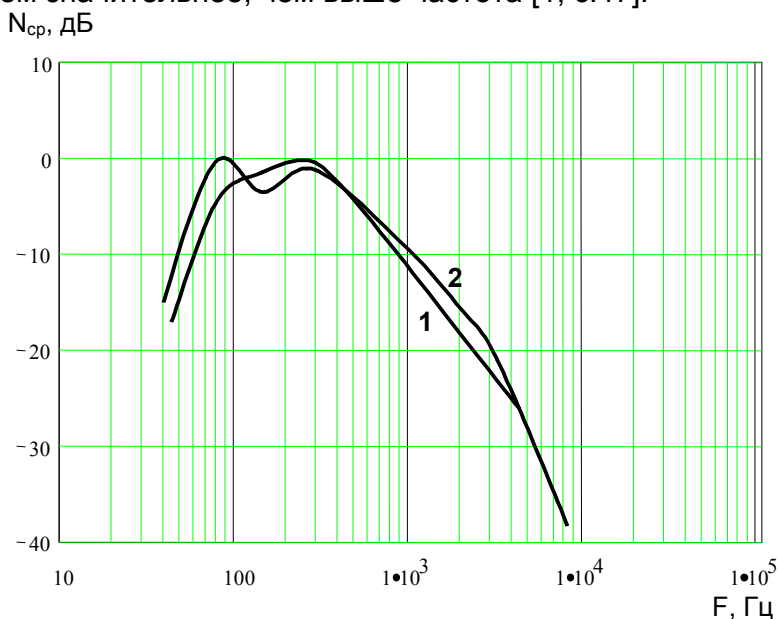


Рисунок 2.1 – Среднестатистические спектры первой (1) и второй (2) общесоюзных программ звукового вещания

На рисунке 2.1 показаны “немного устаревшие” среднестатистические суточные графики спектральной плотности мощности первой (1) и второй (2) общесоюзных про-

грамм звукового вещания [1, с.47]. Зависимости на рисунке 2.1, полученные с учетом распределения программ разных жанров по длительности, характеризуют (вследствие регулярности суточных программ) сведения о СЗВ в целом.

Уровень спектральной плотности мощности уменьшается на низких (ниже 70 Гц) и верхних (выше 3 кГц) частотах, причем 0 дБ соответствует значению максимальной спектральной плотности мощности, достигаемой в сигналах каждой из этих программ. Как и следовало ожидать, форма полученных зависимостей (рисунок 2.1) в основном определяется спектральной плотностью средней мощности сигнала того жанра звучания, который в суточной программе занимает наибольшее время и имеет наибольшую мощность. Например для первой программы определяющей передачей является речь, для второй – оркестровая музыка и речь.

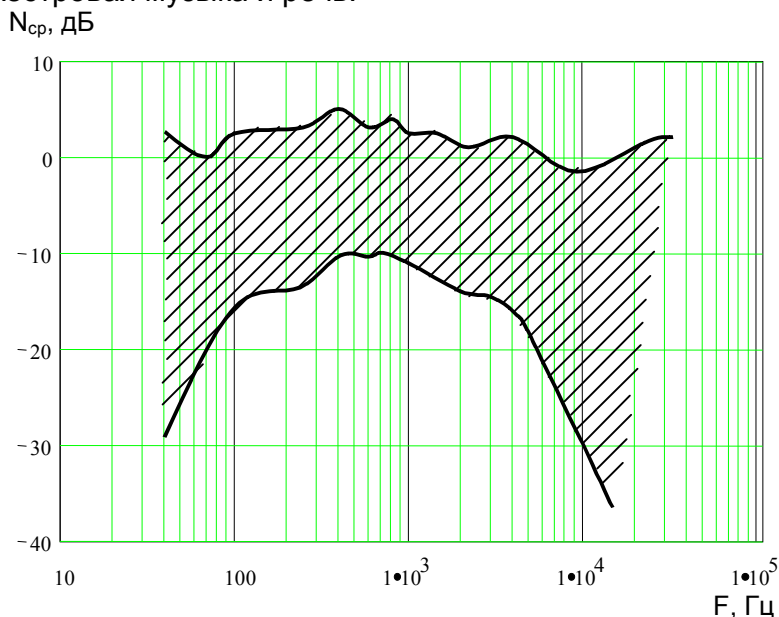


Рисунок 2.2 – Диапазон спектров музыкальных сигналов

До сих пор речь шла о спектрах, представляющих собой усредненные данные для множества отрывков СЗВ одного или разных жанров звучания. Однако, каждый отрезок СЗВ, даже столь большой длительности и соответствующий одному и тому же виду звучания, обладает своим индивидуальным спектром максимальных и средних значений мощности, своим распределением спектральной плотности мощности.

Кроме того, применение необычных способов инструментовки произведений, характерное для современной музыки, а также электронных методов преобразования спектров сигналов и синтезаторов привело к расширению спектров (для отдельных фрагментов программ) вплоть до самых высших частот (рисунок 2.2).

Вообще говоря, психоакустические эксперименты показывают, что для высококачественной передачи музыки канал звукового вещания должен иметь полосу частот 30...15000 Гц [1, с.48]. При этом отсутствие более высоких частот все же отчетливо замечается молодыми слушателями, музыкантами и, по их мнению, ухудшает качество восприятия. Поэтому в студийной аппаратуре полоса передаваемых частот составляет 20...20000 Гц [1, с.49].

2.3 Динамический диапазон и средняя мощность сигналов звукового вещания

Общее определение динамического диапазона СЗВ сформулировано международной организацией по телевидению и радиовещанию как отношение максимального давления ($p_{зв.макс}$) к минимальному ($p_{зв.мин}$), характеризующее данный звуковой процесс, или отношение соответствующих напряжений ($U_{макс}$ и $U_{мин}$). Однако, это определение не содержит сведений от том, что подразумевается под максимальным и минимальным давлениями или напряжениями.

При определении динамического диапазона вводят понятия квазimaxимального и квазиминимального напряжений (или давлений). Квазimaxимальным ($U_{кв.макс}$ или $p_{зв.кв.макс}$) будем называть такое значение, вероятность превышения которого достаточно мала 0.01...0.02, а квазиминимальным ($U_{кв.мин}$ или $p_{зв.кв.мин}$) – такое, вероятность превышения которого, наоборот, достаточно велика 0.98...0.99.

С учетом введенных определений динамический диапазон акустического вещательного сигнала

$$D_a = 20 \lg(p_{зв.кв.макс}/p_{зв.кв.мин}) = 20 \lg(p_{зв.кв.макс}/p_{зв0}) - 20 \lg(p_{зв.кв.мин}/p_{зв0}), \quad (2.7)$$

Динамический диапазон электрического вещательного сигнала

$$D_э = 20 \lg(U_{кв.макс}/U_{кв.мин}) = 20 \lg(U_{кв.макс}/U_0) - 20 \lg(U_{кв.мин}/U_0). \quad (2.8)$$

Здесь $p_{зв0} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – минимальное значение звукового давления, соответствующее порогу слышимости в области максимальной чувствительности уха 1...4 кГц; $U_0 = 0.775$ В – напряжение на нагрузке сопротивлением 600 Ом, на которой выделяется мощность 1 мВт.

Динамический диапазон сигнала, определяемый выражениями (2.7) и (2.8), будем называть теоретическим. Наряду с этим динамический диапазон СЗВ D_c можно найти экспериментально с помощью уровнеграммы как разность максимального $N_{макс}$ и минимального $N_{мин}$ уровней для достаточно большого по длительности интервала наблюдения:

$$D_c = N_{макс} - N_{мин}. \quad (2.9)$$

Очевидно, что это значение динамического диапазона существенно зависит от выбранного времени интеграции t_i измерителя уровней. Чем больше t_i , тем в меньшей степени будут регистрироваться кратковременные выбросы СЗВ, тем меньшим окажется найденное значение D_c . Заметим, что теоретическое значение динамического диапазона сигнала, рассчитанное с помощью распределения во времени мгновенных значений напряжения или звукового давления и выражений (2.7) и (2.8), всегда больше экспериментального значения (2.9) для одного и того же исследуемого отрывка.

Динамические диапазоны отдельных типов акустических музыкальных и речевых сигналов, измеренные с помощью приборов, показания которых соответствуют слуховому восприятию уровня громкости (при этом $t_i = 60$ мс), составляют в среднем: 60 дБ для симфонического оркестра; 35 дБ для эстрадной музыки; 20 дБ для джаз-оркестра; 47 дБ для хора; 35 дБ для солистов-вокалистов; 25 дБ для речи диктора. При воспроизведении речи максимальный акустический уровень 80...86 дБ, а при воспроизведении музыкальных сигналов доходит до 90...100 дБ. Оркестр создает предельно большие звуковые давления (до 40 Па), но вероятность их возникновения и длительность непрерывного существования ничтожно малы. Среднее звуковое давление, создаваемое оркестром на расстоянии 4 м от эстрады, 0.5...0.7 Па; а создаваемое оратором на расстоянии 1 м 0.1 Па.

Пиковое значение мощности излучения изменяется в очень широких пределах от одного музыкального инструмента к другому: 0.05 Вт – треугольник; 0.29 Вт – бас-саксофон; 24.6 Вт – большой барабан. Для музыкальных сигналов (симфонический оркестр) это значение изменяется в пределах 8.2...66.5 Вт, но чаще всего составляет 10...14 Вт.

Разность между квазimaxимальным ($N_{кв.макс}$) и усредненным ($N_{ср}$) за длительный промежуток времени уровнями называют пик-фактором:

$$П = N_{кв.макс} - N_{ср}. \quad (2.10)$$

Пик-фактор показывает, насколько ниже средний уровень по сравнению с его квазimaxимальным значением. Для музыкальных сигналов он может достигать 20 дБ и более (звучание симфонического оркестра), а для речевого сигнала в среднем составляет

12 дБ.

Не следует смешивать два разных понятия: динамический диапазон сигнала D_c и канала передачи D_k . Последний зависит как от уровня шумов в тракте, так и от номинального напряжения:

$$D_k = 20 \lg(U_{\text{ном}}/U_{\text{ш}}) - (\Delta N_1 + \Delta N_2). \quad (2.11)$$

Здесь $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение; $U_{\text{ш}}$ – напряжение шума, измеренное псофометром (значения $U_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ш}}$ должны быть приведены либо ко входу, либо к выходу канала передачи); ΔN_1 – уровень перекрытия помех шумов, дБ (обычно около 20 дБ); ΔN_2 – допуск на перегрузку (обычно 3...6 дБ). Причем первый член выражения (2.11) называется соотношением сигнал/шум.

Очевидно, что передача СЗВ по каналу звукового вещания без искажений возможны, если $D_c < D_k$. Так как для реальных акустических сигналов это условие в ряде случаев не выполняется, то необходима предварительная обработка СЗВ, заключающаяся в сокращении его динамического диапазона, который в каналах и трактах звукового вещания (после обработки исходных сигналов звукорежиссером) не превышает 40 дБ.

3 Естественные источники звука, параметры, виды

Музыкальные источники. Определим некоторые из используемых музыкальных терминов. Сложность в том, что нельзя рассматривать характеристики источников в отрыве от свойств слуха и наоборот. Но с чего то надо начинать, поэтому рассмотрим характеристики источников звука, полагаясь пока на Ваше обыденное знание о свойствах слуха.

Артикуляция - произнесение слогов, слов, текста (речевая артикуляция) с различной степенью разборчивости; исполнение музыкантом таких указаний композитора, как, например, **legato** (связанное звучание) и **staccato** (отрывистое звучание), называется музыкальной артикуляцией. Критерием оценки аудиосистемы является разборчивость музыкальной артикуляции.

Атака - переходный процесс, характеризующий установление музыкального звука. Атака в первую очередь определяет индивидуальные особенности (узнаваемость) звучания музыкальных инструментов.

Вибрато - незначительное периодическое изменение высоты (частотное вибрато) и амплитуды (амплитудное вибрато) музыкального звука. Звучание инструментов с вибрато приобретает новые тембральные качества и эмоциональную напряженность. Периодичность вибрато находится в пределах от 5 до 7 Гц.

Тон - составляющая частотного спектра музыкального звука, имеющая определенную высоту и обозначаемая определенной нотой.

Диапазон музыкального инструмента - диапазон частот его тонов.

Обертоны - кратные тону высокочастотные составляющие в спектре звучания музыкального инструмента. Обертональный состав в значительной степени определяет тембр звучания голоса и музыкальных инструментов.

Форманта - область частот (не зависящая от высоты звука), в которой заметно усиливается звучание попадающих в нее обертонов или основного тона. "АЧХ" источника.

Штрих - прием музыкального звуко-извлечения (плавный, толчкообразный, отскакивающий). Он порождает особый характер звучания музыкального инструмента, иногда воспринимаемый как небрежность. Основные типы штрихов отработаны на смычковых (струнных) инструментах.

Виды музыкальных источников.

Певческий голос (диапазон от 80 до 1000 Гц для мужского голоса и от 160 до 1300 Гц для женского).

Основные характеристики качества:

- тональный баланс между нижней (около 500 Гц) и верхней (около 3000 Гц) форманта-

ми. Нижняя форманта отвечает за теплоту и округлость звучания голоса, верхняя - за его блеск;

- живость (изменчивость), динамические оттенки;
- чистота вибрато и интонации;
- разборчивость артикуляции.

Смычковые инструменты.

- **скрипка** (диапазон от 136 до 2000 Гц);
- **альт** (от 131 до 1100 Гц);
- **виолончель** (от 65 до 700 Гц);
- **контрабас** (от 41 до 240 Гц).

Все перечисленные инструменты занимают разные частотные диапазоны, однако имеют сходные признаки звучания.

Характеристики качества (и собственно инструмента и исполнения):

- тональный баланс между тремя ее формантами: первая - на частотах от 220 до 300 Гц (отвечает за полноту и звучность инструмента), вторая - в диапазоне частот от 600 до 800 Гц (у скрипок Страдивари она на частоте 630 Гц) и третья - в диапазоне от 1400 до 4500 Гц. Последняя форманта отвечает за сочность, "светлоту" и "полетность" звука.
- пропорций между первыми ее шестью обертонами.

Как и в случае певческого голоса, главным для достижения натуральности звучания скрипки является передача живости (изменчивости) ее "голоса", чистоты интонации и вибрато, а также яркость воспроизведения штрихов. Все эти особенности звучания описываются критерием "ясность".

В противоположность описанному встречается очень детальное, ясное воспроизведение звучания смычковых инструментов, но звук при этом может восприниматься как "резкий" и "рваный", исчезает ощущение "пения". Такое звучание вызывает чувство дискомфорта и утомляет. Опыт показывает, что очень трудно добиться такой передачи звука смычковых, при которой в той или иной мере не наблюдался бы один из указанных дефектов.

Щипковые инструменты. Все щипковые инструменты характеризуются быстрой атакой (от 1 до 5 мс) и длительным затуханием звука (от 1 до 5с).

- **клавесин** (диапазон от 87 до 1400 Гц);

Звук клавесина чрезвычайно богат обертонами, которые заполняют практически весь средневысокочастотный диапазон слухового восприятия.

Характеристики качества:

- нежность, тонкость и очень детальность звука.
- **акустическая гитара** (от 81 до 1300 Гц).

Ее может иметь у себя дома каждый аудиофил, поэтому она является эталонным источником звука. При воспроизведении через аудиосистему звучания гитары нужно обратить внимание на то, как звучит щипок - при записи следует добиваться сходства с натуральным его звучанием.

- **арфа** (от 34,6 до 3320 Гц). "Глиссандо" - быстрое проведение пальца одной руки (или пальцев обеих рук) по струнам инструмента.

- **контрабас щипковый** (от 41 до 240 Гц).

Клавишные инструменты

- **рояль** (диапазон от 27,5 до 4186 Гц).

Характеристики качества:

- специфика атаки,
- специфика затухания,
- специфика тембров нижнего регистра (с присутствием легкого рокотания),
- звучность среднего регистра,
- яркости верхнего регистра.
- разделенность звуков при игре staccato.
- динамические оттенки.

Дефекты, наиболее часто встречающиеся при воспроизведении через аудиосистему звучания рояля: это неотчетливая или "надтреснутая" атака, а также неестествен-

ный или окрашенный тембр звучания его регистров.

Деревянные духовые инструменты.

- **флейта поперечная** (диапазон от 261 до 2093 Гц);
- **кларнет** (от 139 до 1500 Гц);
- **гобой** (от 233 до 1568 Гц);
- **английский рожок** (от 165 до 1800 Гц);
- **фагот** (от 58 до 622 Гц).

Благодаря различию частот формант и специфическому распределению обертонов каждый инструмент этой группы имеет ярко выраженную индивидуальность. Характеристики качества.

- гладкость и "текучесть" звучания (объясняется быстрым спадом к высоким частотам энергии обертонов);
- плавность и чистота интонации.

Медные духовые инструменты

- **концертная труба** (диапазон от 185 до 1046 Гц);
пронзительный звук.
- **валторна** (от 61 до 700 Гц);
- **тромбон** (от 81 до 520 Гц).

Характеристики:

- яркое, выразительное звучание, особенно в области атаки. Атака длится от 20 до 100 мс и характеризуется быстрой и очень сложной перестройкой обертонового состава.

Ударные инструменты

- **кастаньеты** (спектр в диапазоне от 0,6 до 16 кГц);
- **ксилофон** (спектр распространяется до 9 кГц);
- **тарелка** (большая оркестровая) (от 800 Гц до 18 кГц);
- **тарелка джазовая** (от 500 Гц до 18 кГц);
- **малый барабан** (спектр распространяется до 4 кГц).

Сухой трескучий звук.

- **литавра большая** (от 87 до 800 Гц). Чистый, звонкий и глубокий бас.

Все ударные инструменты характеризуются резкой атакой (меньше 1 мс у кастаньет и ксилофона и около 16 мс у большой литавры) и слабо выраженным тональным характером их звучания.

Характеристики качества:

- динамика (динамических контрастов),
- ясность передачи атаки,
- отсутствие "окраски".

Все вышеупомянутые сведения взяты из [2].

4 Дискретное прямое преобразование Фурье

Чтобы получить спектральный состав (для анализа в частотной области) сигнала $f(t)$ необходимо использовать прямое преобразование Фурье [3, с.549-554], [4, с.378]:
для периодической функции с периодом T

$$F_i = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \exp\left(-j \frac{2\pi i t}{T}\right) dt; \quad (4.1)$$

для непериодической функции

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (4.2)$$

Для дискретных сигналов прямое преобразование Фурье имеет вид [5]

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} v_k \exp\left(-j \frac{2\pi i k}{n}\right), \quad (4.3)$$

где c_j ($i=0,1,\dots,2^{m-1}$) – элементы результирующего вектора \mathbf{C} (отсчеты спектра), v_k ($k=0,1,\dots,2^m-1$) – элементы исходного вектора \mathbf{V} (отсчеты сигнала во времени), здесь $n=2^m$ – количество отсчетов вектора \mathbf{V} . Таким образом, если $m=11$, то количество отсчетов вектора \mathbf{V} равно $n=2^m=2^{11}=2048$, а количество отсчетов результирующего вектора \mathbf{C} – $q=1+2^{m-1}=1+2^{11-1}=1023$ (дополнительная формула $q=(n/2)-1$).

Формула (4.3) может быть легко получена из (4.1) путем замены интервала интегрирования T на n , переменной интегрирования t на k , а также знака интеграла на сумму с соответствующими пределами.

При этом шаг (разрешение) по частоте для (4.3) определяется по формуле

$$\Delta F = F_d/n, \quad (4.4)$$

где $F_d=1/T$ – частота дискретизации исходного сигнала.

Верхняя предельная частота (согласно теореме Котельникова) равна

$$F_b = F_d/2. \quad (4.5)$$

Чтобы управлять разрешением по частоте при постоянной частоте дискретизации, используют разреженную выборку отсчетов дискретизированного сигнала:

$$c_i = \frac{d}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \tilde{v}_k \exp\left(-j \frac{2\pi i k}{n}\right), \quad (4.6)$$

где $d=1,2,3,\dots,n$ – коэффициент разреженности; \tilde{v}_k – отсчеты разреженного вектора исходного сигнала:

$$\tilde{v}_k = \begin{cases} v_k & \text{если } k = d \cdot p, \text{ где } p = 0,1,2,\dots, \text{FIX}\left[\frac{n}{d}\right] - 1; \\ 0 & \text{если } k \neq d \cdot p \end{cases} \quad (4.7)$$

Функция $\text{FIX}[]$ в формуле (4.7) обозначает взятие целой части числа с отсечением дробной. В формуле (4.6) добавлен множитель d , учитывающий изменение количества отсчетов разреженного вектора. Достоинством такого метода разрежения является то обстоятельство, что количество отсчетов результирующего вектора \mathbf{C} остается постоянным при изменении коэффициента разреженности d .

Тогда разрешение по частоте и верхняя предельная частота находятся с учетом разрежения:

$$\Delta F = F_d/(n \cdot d); \quad (4.8)$$

$$F_b = F_d/(2 \cdot d). \quad (4.9)$$

Введение разреженной выборки отсчетов с коэффициентом разреженности d эквивалентно уменьшению частоты дискретизации в d раз.

Чтобы получить спектр сигнала в общепринятом виде (в дБ) необходимо взять модуль комплексной частотной характеристики (КЧХ) и перевести полученное значение в децибеллы:

$$A_i[\text{дБ}] = 20 \cdot \log \frac{\sqrt{\text{Re}^2(c_i) + \text{Im}^2(c_i)}}{U_0}, \quad (4.10)$$

где $\text{Re}(C_i)$ и $\text{Im}(C_i)$ – соответственно реальная и мнимая части i -го отсчета КЧХ, U_0 – некий нормирующий коэффициент.

Формула (4.10) может быть использована для расчета спектрального состава сигнала для выборки сигнала длиной n отсчетов. При этом конкретная выборка сигнала используется для расчета мгновенного спектра сигнала (например, при расчете спектра сигнала в реальном времени). Чтобы получить некий усредненный спектр нужно вводить усредняющую функцию по ансамблю выборок спектра:

линейное усреднение (среднеарифметическое)

$$\bar{A} [\text{дБ}] = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R A_r \right), \quad (4.11)$$

степенное усреднение (среднегеометрическое)

$$\bar{A} [\text{дБ}] = 20 \cdot \log \sqrt[R]{\prod_{r=1}^R A_r} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R 20 \log(A_r), \quad (4.12)$$

где R – количество выборок усреднения спектра, A_r [раз] – r -я спектральная выборка (вектор, состоящий из n отсчетов).

5 Экспериментальное задание

Согласно приложению А по своей фамилии студент определяет имена файлов, которые подлежат анализу в пунктах 1-4. Для спектрального анализа всех файлов необходимо использовать программу SpectraLab.

1. Определить частоту тона и максимальный уровень сигнала по спектру сигнала. Файл сигнала чистого тона находится в каталоге **01_SIN**. Имя анализируемого файла определить согласно приложению А.
2. Проанализировать два отрывка сигналов речи (мужского и женского голосов). Определить частотный диапазон, в котором лежат основные форманты голоса. Файлы сигналов речи находятся в каталоге **02_VOICE**. Имена анализируемых файлов определить согласно приложению А.
3. Проанализировать три отрывка звучания различных музыкальных инструментов. Определить основной частотный диапазон звучания инструментов. Сравнить полученные результаты со сведениями, приведенными в пункте 3. Файлы сигналов звучания музыкальных инструментов находятся в каталоге **03_INSTR**. Имена анализируемых файлов определить согласно приложению А.
4. Проанализировать три отрывка звучания различных жанров музыки. Определить частотные диапазоны, а также провести сравнительный анализ спектрального состава всех трех жанров музыки (необходимо зарисовать форму спектра сигналов музыки на одном графике). Файлы сигналов музыки находятся в каталоге **04_MUSIC**. Имена анализируемых файлов определить согласно приложению А.

6 Указания по проведению экспериментального исследования

1. Порядок анализа файла в программе SpectraLab:
 - устанавливаем режим анализа файлов **Mode/Post Process** (Режим/Прошедший процесс);
 - устанавливаем режим просмотра спектра **View/Spectrum** (Просмотр/Спектр). Остальные режимы необходимо выключить;
 - при помощи опции **File/Open** (Файл/Открыть) загружаем анализируемый файл *.wav из соответствующего каталога;

- запускаем анализ спектра при помощи кнопки **Run analyzer** (запуск анализатора) на передней панели программы (для повторного анализа необходимо предварительно нажать на кнопку перемотки на передней панели программы);
- устанавливаем нужный режим отображения графика при помощи кнопок на передней панели программы. Например, **Display spectrum as bar graph** (показать спектр как график прямоугольников) и **Autoscale current spectrum** (автошкала по оси спектральной плотности). При просмотре спектра можно осуществлять масштабирование посредством кнопки **Zoom in along frequency axis** (увеличение по оси частот) на передней панели программы.

2. Установки при анализе файлов

- при анализе всех файлов необходимо использовать опцию **Peak Hold** (удерживать пики), которую можно установить при помощи флажка на лицевой панели программы. Также изменить значение **Peak Hold** можно, зайдя в **Options/Settings**;
- Что касается самих установок в **Options/Settings**, то их расшифровки приведены ниже:

Sampling Rate – частота дискретизации (параметр автоматически устанавливается в соответствии с форматом анализируемого файла);

Decimation Ratio – коэффициент прореживания (можно устанавливать больше 1 при анализе сигналов в п.1, в п.2-4 должен быть равен 1);

FFT size (samples) – количество отчетов выборки прямого преобразования Фурье, т.е. это то количество отсчетов, на основе которого производится усреднение (требуемое значение 2048);

Spectral Line Resolution – разрешение спектральной линии. Чем больше параметры Decimation Ratio и FFT size и меньше параметр Sampling Rate, тем меньше (лучше) разрешение по частоте;

Frequency Limit – ограничение по частоте (верхняя граничная частота анализируемого сигнала);

Sampling Format – формат дискретизации (параметр автоматически устанавливается в соответствии с форматом анализируемого файла).

3. Измерения

- измерения проводить при помощи перекрестного курсора, появляющегося при нажатии левой клавиши мыши в поле графика спектра;
- при определении основного частотного диапазона сигналов не учитывать частотные составляющие с относительно малым уровнем;
- при определении общего частотного диапазона необходимо учитывать практически все частотные составляющие (кроме самых малых).

Контрольные вопросы

- 1) Основные параметры сигналов звукового вещания (СЗВ).
- 2) Что такое долговременная средняя мощность СЗВ?
- 3) Что представляет из себя спектральная плотность мощности?
- 4) Какой из жанров звуковых сигналов имеет наибольший динамический диапазон и почему?
- 5) Полоса частот, используемая в радио- и телефонных системах связи. Объяснить, почему выбрана именно такая полоса частот?
- 6) Чему эквивалентно усреднение спектра в течение долгого времени?
- 7) Полоса частот, принятая в высококачественном УКВ радиовещании. Причина выбора именно такой полосы частот.
- 8) Полоса частот профессиональной звукозаписывающей/ звуковоспроизводящей аппа-

ратуры. Объяснить выбор.

- 9) Какой из параметров звука позволяет передать многоканальность?
- 10) Что определяет динамический диапазон звуковых сигналов? Каковы ограничения, накладываемые на тракт передачи сигнала?
- 11) Определение и физический смысл пик-фактора.
- 12) Что такое тон?
- 13) Что такое обертон?
- 14) Что такое форманта?
- 15) Частотные диапазоны мужского и женского певческих голосов?
- 16) Частотные диапазоны скрипки и альта.
- 17) Частотные диапазоны виолончели и контрабаса.
- 18) Основные характеристики качества певческих голосов.
- 19) Основные характеристики качества смычковых инструментов.
- 20) Частотные диапазоны клавесина и акустической гитары.
- 21) Частотные диапазоны арфы и рояля.
- 22) Характеристики качества клавишных инструментов.
- 23) Дефекты воспроизведения клавишных инструментов через аудиосистему.
- 24) Частотный диапазон деревянных духовых инструментов.
- 25) Частотный диапазон медных духовых инструментов.
- 26) Спектр каких инструментов занимает наибольший частотный диапазон?
- 27) Частотный диапазон ксилофона.
- 28) Частотный диапазон тарелки.
- 29) При помощи какой теоретической базы рассчитывается спектр звуковых сигналов?
- 30) Ограничения, накладываемые на верхнюю частоту анализируемого дискретизированного сигнала.
- 31) Что такое частота и период дискретизации?
- 32) Смысл коэффициента разрежения.
- 33) Ограничения, накладываемые на размер временной выборки. Количество отсчетов результирующего вектора прямого дискретного преобразования Фурье.
- 34) Чем определяется разрешение по частоте?
- 35) Как производится усреднение спектра сигнала.
- 36) Пояснить назначение функции Peak Hold в программе SpectraLab.

Список использованных источников

- 1 Радиовещание и электроакустика: Учебник для вузов/ А.В.Выходец, М.В.Гитлиц, Ю.А.Ковалгин и др.; Под ред.М.В.Гитлица. – М.: Радио и связь, 1989. – 432 с.
- 2 http://members.xoom.com/spb_audio/ispoln.htm
- 3 Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: 1965. – 608 с.
- 4 Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
- 5 MathCad 7.0 Professional: Help/ Real Fourier Transform

Приложение А

(Обязательное)

Выбор варианта

1. Сигналы чистых тонов

Каталог: **01_Sin**

Для выбора файла в данном пункте используйте первую букву своей фамилии, например, **Сорокин** (буква «С»).

Таблица А.1 – Выбор сигнала чистого тона

Буква	Имя файла
А, Р	01.wav
Б, С	02.wav
В, Т	03.wav
Г, У	04.wav
Д, Ф	05.wav
Е, Х	06.wav
Ж, Ц	07.wav
З, Ч	08.wav
И, Й	09.wav

К, Ш	10.wav
Л, Щ	11.wav
М, Ы	12.wav
Н, Э	13.wav
О, Ю	14.wav
П, Я	15.wav

2. Сигналы речи

Каталог: **02_Voice**

Для выбора файлов в данном пункте используйте вторую букву своей фамилии, например, Сорокин (буква «О»).

Таблица А.2 – Выбор сигналов речи

Буква	Имя файла
А, Р	01.wav (м), 07.wav (ж)
Б, С	02.wav (м), 10.wav (ж*)
В, Т	03.wav (м), 14.wav (ж*)
Г, У	04.wav (м), 07.wav (ж)
Д, Ф	05.wav (м), 10.wav (ж*)
Е, Х	06.wav (м), 14.wav (ж*)
Ж, Ц	07.wav (ж), 02.wav (м)
З, Ч	08.wav (м), 10.wav (ж*)
И, Й	09.wav (м), 14.wav (ж*)
К, Ш	10.wav (ж*), 11.wav (м*)
Л, Щ	11.wav (м*), 14.wav (ж*)
М, Ы	12.wav (м*), 10.wav (ж*)
Н, Э	13.wav (м*), 14.wav (ж*)
О, Ю	14.wav (ж*), 12.wav (м*)
П, Я	15.wav (м*), 10.wav (ж*)

Пояснение: комментарии в скобках означают следующее: м – мужской голос, ж – женский голос, * – означает, что отрывок взят из оперы (иначе из разговора).

3. Сигналы звучания музыкальных инструментов

Каталог: **03_Instr**

Для выбора файлов в данном пункте используйте третью букву своей фамилии, например, Сорокин (буква «Р»), либо первую букву, если фамилия состоит из двух символов (Ли – буква «Л»).

Таблица А.3 – Выбор сигналов звучания музыкальных инструментов

Буква	Имя файла
А, Р	01.wav (о), 16.wav (м.б), 31.wav (тр)
Б, С	02.wav (о), 17.wav (к), 32.wav (тр)
В, Т	03.wav (о), 18.wav (с.б), 33.wav (тр)
Г, У	04.wav (о), 19.wav (т), 34.wav (в)
Д, Ф	05.wav (о), 20.wav (б.б), 35.wav (тр)
Е, Х	06.wav (п), 21.wav (г), 36.wav (кл)
Ж, Ц	07.wav (п), 22.wav (г), 37.wav (кл)
З, Ч	08.wav (п), 23.wav (г), 38.wav (кл)
И, Й	09.wav (п), 24.wav (г), 39.wav (кл)
К, Ш	10.wav (п), 25.wav (г), 40.wav (кл)
Л, Щ	11.wav (п), 26.wav (с), 41.wav (ф)
М, Ы	12.wav (п), 27.wav (с), 42.wav (ф)
Н, Э	13.wav (п), 28.wav (с), 43.wav (ф)
О, Ю	14.wav (п), 29.wav (с), 44.wav (ф)

П, Я	15.wav (п), 30.wav (с), 45.wav (ф)
-------------	-------------------------------------------

Пояснение: комментарии в скобках означают следующее: **о** – орган, **п** – пианино (рояль, фортепьяно), **м.б** – малый барабан, **к** – кастаньеты, **с.б** – средний барабан, **т** – тарелки, **б.б** – большой барабан, **г** – классическая гитара, **с** – смычковые (скрипка, альт, контрабас), **тр** – труба (саксофон), **в** – валторна, **кл** – клавесин, **ф** – флейта.

4. Сигналы звучания музыкальных инструментов

Каталог: **03_Instr**

Для выбора файлов в данном пункте используйте четвертую букву своей фамилии, например, Сорокин (буква «О»), первую букву, если фамилия состоит из трех символов (**Ким** – буква «К»), и вторую букву, если фамилия состоит из двух символов.

Таблица А.4 – Выбор сигналов звучания различных типов музыки

Буква	Имя файла
А, Р	01.wav (к), 16.wav (м), 31.wav (п)
Б, С	02.wav (к), 17.wav (м), 32.wav (п)
В, Т	03.wav (к), 18.wav (м), 33.wav (п)
Г, У	04.wav (к), 19.wav (м), 34.wav (п)
Д, Ф	05.wav (к), 20.wav (м), 35.wav (п)
Е, Х	06.wav (к), 21.wav (р), 36.wav (п)
Ж, Ц	07.wav (к), 22.wav (р), 37.wav (п)
З, Ч	08.wav (к), 23.wav (р), 38.wav (п)
И, Й	09.wav (к), 24.wav (р), 39.wav (п)
К, Ш	10.wav (к), 25.wav (р), 40.wav (п)
Л, Щ	11.wav (м), 26.wav (р), 01.wav (к)
М, Ы	12.wav (м), 27.wav (р), 02.wav (к)
Н, Э	13.wav (м), 28.wav (р), 03.wav (к)
О, Ю	14.wav (м), 29.wav (р), 04.wav (к)
П, Я	15.wav (м), 30.wav (р), 05.wav (к)

Пояснение: комментарии в скобках означают следующее: **к** – классика, **м** – металл, **р** – рок-музыка, **п** – популярная музыка.