

Введение

Звук, звуковые сигналы, возможность слухового восприятия — фундаментальные составляющие полноценной жизни человека, среды его обитания. Звуковое и радиовещание стали неотъемлемой частью жизни общества, важным средством политического, эстетического и нравственного воздействия на население. Радиовещание по-прежнему, несмотря на популярность телевидения, остается основным источником информации для миллионов людей. Одним из главных преимуществ радиовещания как средства доставки информации является оперативность, недостижимая пока телевидению. Ниже приведены данные из отраслевого доклада Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям, опубликованного в 2019 г. [1].

В докладе отмечается важность сочетания традиций и новаторства в использовании новых технологий, которые дают большое число возможностей для распространения информации и увеличения охвата вещания радиостанциями. Радио остается востребованным средством массовой информации как в России, так и в Европе и стремительно расширяет границы, присущие привычному радио, становится «больше, чем просто радио». Радиовещание в Российской Федерации осуществляется в основном в FM диапазоне (VHF Band II: 87,5...108 МГц) — более половины действующих лицензий выданы на частоты в городах с численностью населения менее 100 тысяч человек, поскольку для жителей малых городов радио является важнейшим доступным источником. Одновременно с эфирным вещанием бурно развивается Интернет-вещание: в мобильных приложениях, на сайтах радиостанций, в социальных сетях, в мессенджерах.

По данным Mediascore в этом году ежемесячно 91 % (58 млн чел.) населения российских городов с численностью от 100 тысяч человек в возрасте старше 12 лет слушали радио: 88 % (56 млн чел.) слушали FM радио, 27 % (17 млн чел.) — в онлайн. Проводным радио пользовались 8,4 миллионов человек; радио слушали через Интернет в смартфоне 7,1 миллионов (на 20 % больше по сравнению с 2017 г.); через спутниковое ТВ \approx 5,2 млн человек (+2 %), а Смарт-ТВ использовали 2,4 миллиона россиян (+2 %).

Радиовещание в нашей стране всегда рассматривалось как средство централизованного идеологического воздействия. Поэтому и ныне существующая в России система государственного вещания по-прежнему централизована и построена по радиально-узловой схеме:

от центра — к региональным узлам, от которых затем сигнал передается на районные узлы. Для повышения «живучести» системы узлы соединены между собой, а первая программа, которая используется для передачи сигналов оповещения, передается по кабельным магистралям, что значительно повышает её помехозащищенность. Преимуществом такой системы является, в частности, простота оповещения населения о действиях в условиях чрезвычайных ситуаций. Однако централизованность организации государственного вещания одновременно является и её недостатком, поскольку позволяет прекратить передачу с помощью одного рубильника, что невозможно при децентрализованной системе вещания.

В стране сосуществуют общероссийское, региональное и местное вещание с государственными, муниципальными и частными формами собственности. Однако становление полноценных вещательных компаний, создающих или ретранслирующих программы и распространяющих их при помощи собственных радиовещательных передатчиков, идет крайне медленно, поскольку появление коммерческих радиостанций пока незначительно изменило ситуацию — большинство из них не имеют своих передающих средств и арендуют их у государственных предприятий.

Системы радиовещания изначально создавались для приема в стационарных условиях на направленную антенну, установленную на высоте уровня крыш. Однако *«мир телекоммуникаций движется к тому, что все абоненты будут мобильными!»* — таков современный тренд развития практически всех услуг электросвязи и вещания. В движении, как правило, условия приема существенно хуже по сравнению с приемом на стационарную антенну, что объясняется интерференцией радиоволн, приходящих в точку приема (на ненаправленную антенну) со всех сторон. Проблемы многолучевого приема особенно обострены в условиях высотной городской застройки. Возможным решением проблемы является переход к цифровому стандарту передачи информации.

В соответствии с мировым опытом задача перспективного развития телерадиовещания решается путем создания абсолютно новых систем вещания, спроектированных таким образом, чтобы удовлетворить высоким требованиям слушателей к качеству вещательных программ при различных условиях приема. Этим требованиям, в частности, отвечают новые системы *цифрового радиовещания* (ЦРВ), основанные на представлении и передаче звуковых сигналов в цифровой форме во всех звеньях вещательного тракта — от студии до абонентского приемника, исключая радиоканал. Применение та-

ких систем, среди прочего, позволяет повысить эффективность использования радиочастотного спектра; улучшить качество приема и увеличить число программ; использовать способы передачи сигналов, которые нечувствительны к помехам и адаптированы к разным средам и условиям распространения; обеспечить мобильный прием без значительного ухудшения качества услуги. В рамках аналоговых систем эфирного радиовещания одновременное достижение этих показателей практически невозможно [2].

Наземные системы ЦРВ сочетают в себе много достоинств как для слушателей, так и для вещателей, а именно: потенциал для обеспечения всеобщего охвата; специальное покрытие (местное, региональное, национальное); фиксированный, портативный (в помещении) и мобильный варианты приема; простые в использовании приемники с легкой настройкой на частоту радиоканала; важное информационное средство для дорожно-транспортного оповещения и спасательных работ; качество звука и мультимедийной информации не зависит от числа слушателей (в отличие от Интернет-радио).

Общие финансовые затраты при вещании в цифровом формате существенно ниже, чем при ЧМ вещании. Это связано с тем, что цифровое радио:

- позволяет транслировать сразу несколько радиопрограмм с одного передатчика;
- позволяет реализовать одночастотную сеть, т. е. вещание на одной и той же частоте, тем самым обеспечивая последовательное и эффективное обслуживание;
- уменьшает затраты на электроэнергию в связи с тем, что мощность передатчика при обслуживании равных зон у цифрового радио значительно ниже, чем ЧМ передатчика.

Основным стимулом внедрения цифрового радиовещания является значительное улучшение качества звука.

Успехи в технике связи, достигнутые к началу 1990-х годов, перевели цифровую передачу радиовещательных программ в практическую плоскость. Для этого должны были состояться два принципиальных технологических прорыва, а именно: *кодирование источника*, позволяющее эффективно устранять избыточность в таких сигналах, благодаря чему многократно уменьшается скорость передаваемого цифрового потока по сравнению с методами ИКМ; *параллельный (многочастотный) метод передачи* на основе ортогонального частотного разделения с мультиплексированием (технология OFDM). Благодаря распараллеливанию цифрового потока

появилась возможность резко снизить скорость передачи на каждой поднесущей, устранив межсимвольные искажения, ввести временной интервал, защищающий приемник от эхо-сигналов, а также реализовать перемежение цифровых данных по времени и по частоте, обеспечив работоспособность приемника в многолучевом канале с частотно-селективными замираниями.

В случае, если в итоге в стране будет принято решение о введении ЦРВ, из имеющихся стандартов наиболее подходящим для использования в условиях России радиосообщество на данный момент считает стандарты DAB+, RABIS и DRM+* [1]. Внедрение этих стандартов существенно повышает эффективность использования радиочастотного ресурса. Так, в полосе частот радиоканала системы DRM+ шириной 100 кГц можно передать до четырех стереофонических программ, включая дополнительную информацию. По сравнению с FM-вещанием повышается качество восприятия звуковых программ за счет имеющейся здесь возможности перехода к многоканальной стереофонии. Стандарт позволяет ввести дополнительные сервисы данных, включая текст, канал дорожных сообщений (ТМС), а также предоставляет возможность использования системы оповещения в чрезвычайных ситуациях (EWF). При использовании DRM+ число радиоканалов увеличивается практически в два раза, а эксплуатационные расходы и сроки окупаемости нового оборудования уменьшаются за счет уменьшения требуемой мощности передатчиков и имеющейся возможности их работы в одночастотной сети, что ведет к дополнительной экономии электроэнергии. Введение нового стандарта не требует изменения частотного планирования, принятого в стране, и позволяет интегрироваться в мировую информационную систему без дополнительных затрат. Это непростое, но принципиальное решение, которое окажет существенное влияние на развитие рынка радиовещания в России. В Европе уже давно идет активное внедрение цифрового стандарта радиовещания.

Европейский вещательный союз (ЕВU) опубликовал весьма конкретную рекомендацию R138* о целесообразности распространения в Европе цифрового радиовещания стандарта DAB+* и использова-

* DRM/DRM30 (*Digital Radio Mondiale*) — концепция цифрового радиовещания на частотах ниже 30 МГц; DRM+ — концепция цифрового радиовещания DRM на частотах до 300 МГц.

* Rec. EBU R138 «*Digital Radio Distribution in Europe*» (2013 г.)

* DAB (*Digital Audio Broadcasting*) — цифровое радиовещание; T-DAB и DAB+ — наиболее распространенные в мире форматы наземного ЦРВ.

ния стандарта DRM30 для цифрового радиовещания в удаленных и малонаселённых регионах [2]. Радиовещание было и остается «сопутствующей средой». Успех радио основывается на мобильности и доступности. Более того, цифровое радио бесплатно, а люди не хотят платить Интернет-провайдерам: Интернет-прослушивание является хорошим вариантом, если пользователь работает за компьютером и хочет слушать радио дома или в офисе. Если же пользователь находится в движении, он выберет цифровое радио как самый удобный вариант, тем более бесплатный. Поэтому ЦРВ на основе платформы DAB/DAB+ становится в мире ведущим в альянсе «ЦРВ + IP-радио». В Европе технология DAB+ прочно утвердилась в качестве ключевой платформы для развития радио в будущем. В декабре 2017 года Норвегия стала первой страной в мире, отключившей на национальном уровне аналоговое FM-вещание. Завершился переход с аналоговых стандартов радиовещания на DAB+, который длился 20 лет. Основная цель данного шага заключается в предоставлении слушателям возможности принимать радиoproграммы в лучшем качестве, в формировании более устойчивой позиции для радио перед лицом растущей конкуренции со стороны цифровых медиа и онлайн-платформ.

IP-радио представляет собой интерактивную среду, которая подстраивается под каждого пользователя, являясь идеальной местом для применения специализированных программ. Оно сочетает в себе как эфирное прослушивание, так и по запросу, обеспечивает доступ к станциям со всего мира. Большая часть Интернет-радиостанций — это машинно-сгенерированные плейлисты. «Настоящие» станции, которые имеют средства и ресурсы для предоставления контента высокого качества, могут предоставлять его по Интернету так же хорошо, как и посредством обычного вещания, однако на приемной стороне контент с большой скоростью передачи будет находиться в опасности «подгружаемости».

IP-радио, потоковое радио (или RoIP), RadioDNS*, Интернет-СоюзIMDA — всё это составляющие понятия под названием «Интернет-радио», популярность которого определяется широким распространением Интернета, благодаря чему радиовещательные компании находят всё новые способы связать сигналы вещания с Интернет-контентом. Проект RadioDNS был разработан для так называемых гибридных радиоприемников, которые принимают радио-

* DNS (*Domain Name System*) — система доменных имен, т. е. компьютерная распределенная система для получения информации о доменных именах, благодаря которой функционирует Интернет-пространство.

вещательные сигналы и одновременно имеют доступ в Интернет. RadioDNS позволяет радиовещателям связать сигнал стандарта FM/DAB (или иного) с передачей по IP предоставляемых услуг, что значительно усиливает впечатление от прослушивания радио. Использование IP-протоколов дополняет и поддерживает обычное радиовещание, а не конкурирует с ним. Факт остается фактом: для вещания в Интернете необходима очень широкая полоса, которая растет пропорционально числу слушателей, что делает Интернет-вещание спектрально неэффективным. Кроме того, инфраструктура IP-радио строится на основе каждого пользователя, поэтому, чем больше слушателей, тем больше серверов необходимо радиостанции. Например, для «гладкой» передачи музыки 100000 пользователям со скоростью потока (*битрейтом*) 48 кбит/с (или 64 кбит/с для аудио- и мультимедийных программ) необходима полоса, обеспечивающая передачу потока в 4,0 Гбит/с. По этим причинам Интернет рассматривают не как конкурента, а как дополнение к традиционному вещанию.

Радио и Интернет — не соперники друг другу, так же как широкополосные услуги не замена радиовещанию. И те и другие имеют свои сильные стороны, которые основываются на демографии, потребностях слушателя, размерах аудитории и местоположении. IP-радио не может достичь такой зоны покрытия, доступности и универсальности, которые присущи традиционному радиовещанию. Однако оригинальность IP-радио заключается в его многообразии, услугах по запросу и в потенциальных инновациях.

Одна из тенденций развития электросвязи — гибридизация средств доставки мультимедийного (ММ) контента пользователю, например, когда для доставки используют цифровой формат вещания в гибридных спутниково-наземных системах (СНС) [2]. Такие радиовещательные системы высокого класса качества способны функционировать при движении абонента с постоянно и быстро меняющимися условиями приёма. Однако эффективное использование гибридных (комбинированных) систем и сетей возможно лишь при их динамическом взаимодействии, которое должно обеспечивать непрерывность обслуживания абонента при его перемещениях на обширных территориях.

Традиционный способ доставки видео- и аудиоконтента абонентам в последнее время не является исключительным и всеобъемлющим. Для дальнейшего развития этих видов сервиса предлагаются услуги гибридного вещания, основанные на интерактивности, сдвиге во времени и возможности воспроизведения в любом мес-

те. Благодаря таким расширенным услугам у вещателя появляются дополнительные возможности для формирования ММ сигнала, а у пользователя — больше свободы в его выборе. При этом вещатели сталкиваются с двумя основными проблемами, связанными с растущим числом вариантов передачи и распространения контента конечному пользователю.

Альтернативное решение представляет собой своеобразный гибрид, когда технология традиционной эфирной *вещательной передачи* (ВП) дополняется *беспроводными широкополосными сетями* (ШПС), которые все чаще используются для реализации современных сервисов. Взаимное использование таких сетей обеспечит совместную работу различных технологий и предоставит новые возможности вещательным компаниям, сетевым операторам и пользователям. В рамках европейского проекта партнерства 3-го поколения 3GPP, направленного на организацию глобальной стандартизации технологий мобильной связи, в последние годы активно развивается технология мультимедийных вещательных многоадресных услуг (MBMS), сфокусированная на совершенствовании режима вещания РВ и ТВ программ. Здесь базовым является стандарт LTE-Advanced (LTE-A), который, среди прочего, поддерживает сервисы «точка-многоточие» (P2MP) в любом формате файла. Однако по прогнозам в будущем технологии LTE и LTE-A не будут в состоянии оказывать услуги в необходимом объеме, оставаясь экономически эффективными.

Одним из возможных решений проблемы может быть использование топологии Tower Overlay, позволяющей вещательной сети брать на себя часть задач широкополосной сотовой сети по доставке в режиме P2MP [2]. Для пользовательского терминала (например, смартфон или планшетный ПК) одноадресные, unicast-услуги здесь доступны через сеть сотовой связи стандарта LTE, а по сети Tower Overlay — данные P2MP, например РВ или ТВ программы. В результате появляется возможность динамически решать, по какой из сетей — посредством ВП или по ШПС — будет доставлена определенная часть контента, соответствующая, например, определенной ТВ или РВ программе. Доставка посредством ВП оптимальна при большом числе абонентов, тогда как в случае малочисленности аудитории идеальным каналом распределения является ШПС.

Особенность топологии Tower Overlay — совмещение двух видов покрытия, осуществляемых, в том числе, в разных диапазонах частот и в разных по размеру зонах обслуживания. Особенно большая зона покрытия достигается применением высоких антенных опор.

Быстрое развитие цифровых технологий представления, обработки и передачи звука привело к необходимости более глубокого изучения в учебном процессе устройства и основ функционирования систем компандирования *звуковых вещательных сигналов* (ЗВС), широко применяющихся во всех современных каналах звукового вещания. Прогресс технологий микросхемотехники открыл реальные возможности практической реализации высокоэффективных устройств цифровой обработки ЗВС. Основная причина использования именно цифровых методов обработки заключается в возможности реализовать достаточно сложные алгоритмы обработки, причем часто в виде одной микросхемы.

Изучению звукового и радиовещания, цифровой обработки и передачи звуковых сигналов, контроля вещательных каналов посвящено значительное число публикаций. Применительно к учебному процессу, достаточно полно эти вопросы изложены в работах преподавателей МТУСИ — в учебных пособиях [4–10], а также в монографиях [2, 11, 12].

В настоящем пособии внимание акцентируется на специфических вопросах, связанных с углубленным изучением различных систем компандирования ЗВС. В первой, вводной, главе кратко рассмотрены характеристики и основы модели восприятия звуковых сигналов, каналы передачи ЗВС, аргументирована необходимость обработки сигнала в каналах звукового вещания, дано общее представление о компандировании ЗВС по амплитуде, частоте и объему цифрового описания. Системы аналогового и цифрового компандирования уровня сигнала рассматриваются во второй главе; третья глава посвящена изучению комплекса вопросов, связанных с компандированием спектра сигнала. В четвертой главе изучается компандирование объема цифрового описания (компактное представление ЗВС). Пятая глава посвящена вопросам оценки качества передачи ЗВС в адаптивных каналах. Завершает пособие лабораторный практикум, содержащий комплект заданий по тематике книги, выполненных с помощью редактора звуковых файлов *AdobeAudition*.

Основу книги составили результаты НИР, выполненных лично или под руководством авторов в течение последних 20 лет, а также материалы лекций, читаемых авторами в течение ряда лет студентам старших курсов, проходящих подготовку на факультете РВТ МТУСИ.

1 Каналы передачи звуковых вещательных сигналов

1.1. Характеристики и основы модели восприятия звуковых сигналов

Характеристики звукового сигнала. Под *звуковым сигналом* (ЗС) понимают электрическое колебание, наблюдаемое на выходе формирующего устройства (*акустоэлектрического преобразователя — микрофона*) при воздействии на его вход звуковой акустической волны (рис. 1.1). После формирования ЗС может подвергаться различным преобразованиям, оставаясь электрическим. В одних случаях электрический сигнал после усиления непосредственно поступает в *электроакустический преобразователь — громкоговоритель или головной телефон*, в других — после ряда преобразований по форме (транспонирование спектра, модуляция и демодуляция, квантование, кодирование, компандирование и т. п.) в конце концов также превращается в акустический сигнал. Акустический сигнал, воздействуя на барабанную перепонку уха, превращается в механический сигнал, а во внутреннем ухе — в сигнал нервной системы. Этот сигнал в центральной нервной системе как бы расшифровывается, в результате чего воссоздаётся первоначальное сообщение или музыкальный образ. В ряде случаев это сообщение может отличаться от исходного, что связано с искажениями в системе связи.

Звуковой сигнал $u(t)$ является случайным процессом, характеризующие который акустические или электрические величины непрерывно изменяются во времени (рис. 1.1). Как случайный процесс, ЗС характеризуется законом рас-



Рис. 1.1. Осциллограмма звукового сигнала

пределения его мгновенных значений, заданным плотностью вероятности $W(x)$ или функцией распределения $F(x)$.

Для получения стабильных распределений анализ проводят на достаточно продолжительных отрывках, одинаковых по характеру

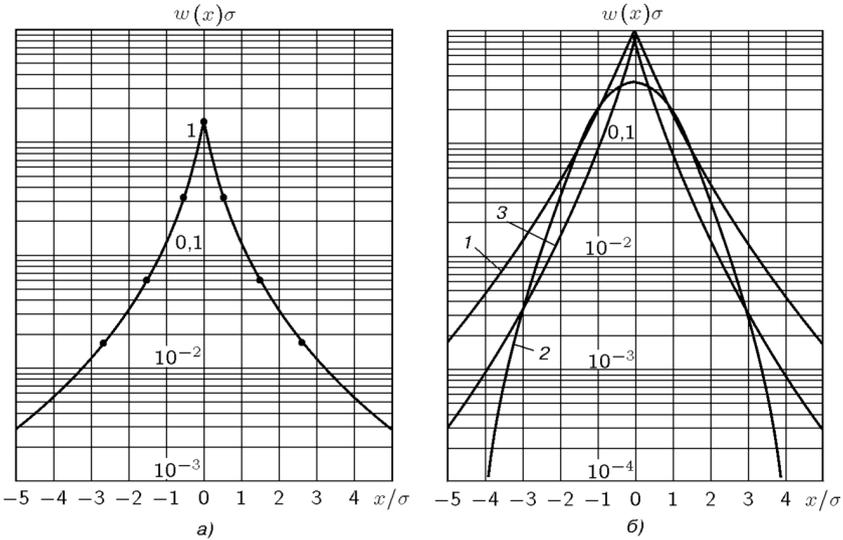


Рис. 1.2. Распределение плотности вероятности мгновенных значений речевого (а) и музыкального (б) звукового сигнала во времени

программ. Минимальное время наблюдения T_0 , дальнейшее увеличение которого не приводит к изменению распределения называется *интервалом стационарности*. Принято, что для речи $T_0 = 2 \dots 3$ мин, а для музыки — от 20 мин до нескольких часов — в зависимости от характера звуковой программы.

На рис. 1.2 приведены типичные экспериментальные результаты, полученные для речевого (а) и музыкальных (б) ЗС. Здесь по оси ординат отложено произведение $W(x)\sigma$, где σ — среднеквадратическое отклонение; по оси абсцисс — отношение его мгновенных значений x к σ . Характер кривых на рис. 1.2б указывает на зависимость распределений от типа звучаний: область 1 — вокал, эстрадная и симфоническая музыка, кривая 2 — хор с оркестром, джазовая музыка.

Уровень ЗС характеризует сигнал в определенный текущий момент времени и представляет собой выраженное в децибелах выпрямленное и усредненное за некоторый предшествующий промежуток времени τ напряжение звукового сигнала, отнесенное к некоторой условной величине U_0 :

$$N(t, \tau) = 20 \lg u(t, \tau)/U_0.$$

Здесь U_0 — среднее значение выпрямленного напряжения за некоторый предшествующий интервал времени, принятое за начало от-

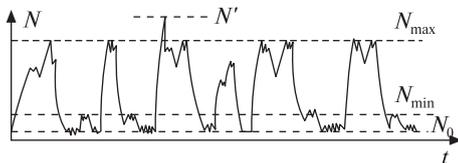


Рис. 1.3. Пример уронеграммы звукового сигнала

счета уровней; ему приписывается уровень 0 дБ. Международными рекомендациями установлены следующие нулевые уровни:

- электрические: для напряжения — 0,775 В (напряжение на нагрузке 600 Ом, на которой выделяется мощность 1 мВт); для мощности — 1 мВт;
- акустические: для звукового давления — $2 \cdot 10^{-5}$ Па (это минимальное звуковое давление, соответствующее порогу слышимости в области максимальной чувствительности уха 1...4 кГц); для интенсивности звука — 10^{-12} Вт/м².

График функции $N(t, \tau)$ называется *уронеграммой* сигнала $u(t)$. Вид уронеграммы (рис. 1.3) зависит от условий ее измерения, особенно от времени интеграции τ . На форму уронеграммы влияют также вид детектирования (квадратичное, линейное или квазипиковое) и динамические характеристики измерительной цепи и измерительного механизма: время срабатывания и время восстановления (возврата).

Закон распределения уровней выражается плотностью $W(N)$ или функцией вероятности $F(N)$; он весьма стабилен (особенно для больших τ) и почти не зависит от характера звуковой программы на длительностях не менее интервала стационарности. Уронеграммы для оценки состояния звукового тракта при передаче по нему ЗС измеряют при $\tau = 10 \dots 20$ мс, а для оценки громкости τ выбирают около 200 мс. На рис. 1.4,а приведены три функции распределения уровней музыкальных программ (за 0 дБ принята медиана распределений), а на рис. 1.4,б те же построения выполнены для речевого сигнала.

Удобными числовыми оценками распределений считаются *квантили*. Квантилем N_i (F_i) называется уровень N_i , величина превышения которого имеет вполне определенную вероятность F_i ; случайная величина N с вероятностью F_i не превосходит своего квантиля N_i . Можно также сказать, что уровень $N(t, \tau)$ не превосходит величины N_i на протяжении доли (или процента) F_i времени наблюдения. Квантиль $N(0,5)$, соответствующий значению $F = 0,5$, называется медианой распределения и характеризует наивероятнейшее значение уровня в данной звуковой программе.

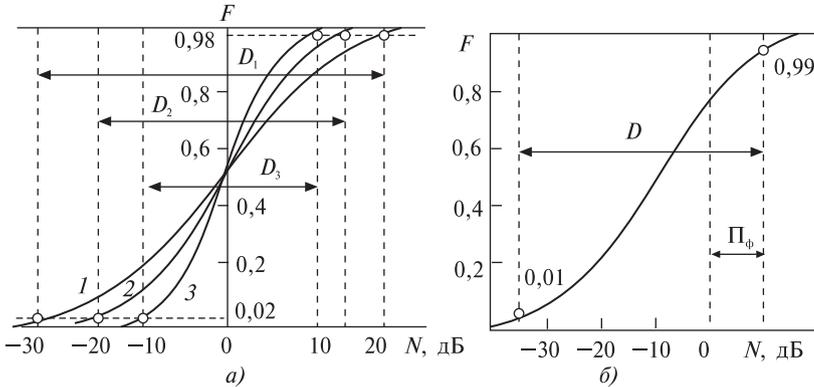


Рис. 1.4. Функции распределения уровней музыкальных программ (а) и речевого сигнала (б)

Пределы изменения уровня определяют *динамический диапазон* (D_c) сигнала. При теоретическом определении динамического диапазона сигнала вводят понятия *квазимаксимального* и *квазиминимального* уровней: вероятность превышения квазимаксимального значения достаточно мала (0,01...0,02), а квазиминимального — достаточно велика и составляет 0,98...0,99. Динамический диапазон определяется разностью квантилей:

- для речевого сигнала $D_{c,\text{реч}} = N(F_i = 0,99) - N(F_i = 0,01)$,
- для музыкальных передач $D_{c,\text{муз}} = N(F_i = 0,98) - N(F_i = 0,02)$.

Разность между квазимаксимальным и усредненным за длительный промежуток времени уровнями называют *пик-фактором*: $\Pi_\Phi = N_{\text{кв.макс}} - N_{\text{ср}}$. Для музыкальных сигналов он может достигать 20...28 дБ, а для речи — в среднем 12 дБ. Значения динамического диапазона (в дБ) ряда натуральных звучаний:

Речь диктора	25... 35
Разговорная речь	35... 40
Эстрадная музыка	35... 40
Актерская речь (художественное чтение)	35... 45
Малые ансамбли, хор	45... 55
Симфоническая музыка	65... 75

Для звуковых сигналов результаты измерений уровней будут устойчивы, если время наблюдения достаточно велико и средняя мощность сигнала постоянна.

Важной характеристикой звуковых сигналов является его *частотный диапазон*. Сопоставляя его с полосой пропускания звукового тракта, судят о наличии или отсутствии частотных искажений выходного сигнала. За верхнюю и нижнюю границу спектра источника звука ($F_{\text{Гр}}$) принимают частоту среза ($F_{\text{ср}}$) обрезающего фильтра,

Таблица 1.1

Частотные диапазоны некоторых источников звука

Источник звука	Граничные частоты	
	нижняя, Гц	верхняя, кГц
Мужской голос	100	7
Женский голос	200	9
Рояль	100	5
Скрипка	200	14
Шум шагов	100	10
Аплодисменты	150	15

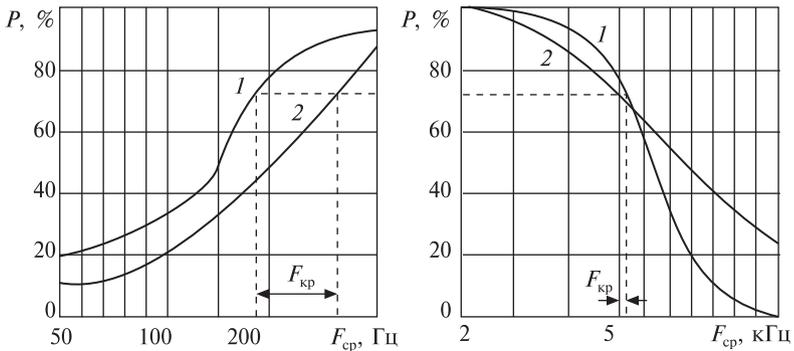


Рис. 1.5. Статистические кривые заметности ограничения полосы частот звукового тракта сверху и снизу для разговорной (1) и вокальной (2) речи

при которой ограничение частотного диапазона замечает $P = 75\%$ слушателей. В табл. 1.1 приведены сведения о частотных диапазонах некоторых источников звука, а на рис. 1.5 — статистические кривые заметности ограничения полосы частот звукового тракта сверху и снизу для разговорной (кривая 1) и вокальной (2) речи.

Примечание. При логарифмической шкале ось частот разбивается равномерно на такие отрезки, что верхняя частота отрезка кратна нижней частоте с некоторым коэффициентом L , т. е. $\omega_{\max i} = L\omega_{\min i}$, где $\omega_{\max i}$ и $\omega_{\min i}$ — максимальная и минимальная частоты i -го отрезка. Коэффициент L (коэффициент кратности, являющийся основанием логарифма в логарифмической шкале) выбирается из соображений удобства практического анализа.

На практике получили распространение две логарифмические шкалы для оси частот:

- $L = 10$ — при этом ось ω разбивается на *декады* частоты, что соответствует десятичным логарифмам шкалы частот и десятикратному изменению частоты;
- $L = 2$ — ось разбивается на *октавы*, что соответствует бинарно-