

В.В. Фурдуев

Акустические основы вещания

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
В11

В11 **В.В. Фурдуев**
Акустические основы вещания / В.В. Фурдуев – М.: Книга по Требованию, 2013. – 319 с.

ISBN 978-5-458-48308-7

Предлагаемая книга написана как учебное руководство по первой (акустической) части курса „Радиовещание и акустика“, читаемого студентам факультета радиосвязи и вещания электротехнических институтов связи. Содержание книги соответствует действующей в настоящее время программе этого курса. Учебное руководство может быть успешно использовано по своему прямому назначению (т. е. студентами, изучающими соответствующий курс со сдачей экзамена) лишь при условии, что изложение материала строго ограничено раскрытием физической картины явлений, смысла и области применения важнейших закономерностей, общими принципами работы аппаратуры и, наконец, анализом решений разнообразных технических задач (с учётом экономических факторов там, где они играют существенную роль). В соответствии с этим рассмотрены в книге типы электроакустических аппаратов, различные варианты оборудования звукоусиления, способы акустической обработки студий и т. п. выбраны с тем расчётом, чтобы дать ясную принципиальную характеристику современных технических средств, а не исчерпывающий их перечень. Вместе с тем выбранные иллюстративные примеры должны научить правильно ориентироваться в порядках величин, встречающихся в тех или иных задачах технической практики.

ISBN 978-5-458-48308-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1.1. Вещание и акустика

Вещанием называется область техники связи, охватывающая организацию и подготовку к передаче различных программ и доведение их до большого числа территориально рассредоточенных слушателей. Под термином „программа” подразумевается то или иное сообщение, передаваемое по каналам вещания: лекция, концерт, спектакль, репортаж, последние известия и т. п. Все такие программы могут передаваться либо как программы чисто звукового вещания, либо в качестве звукового сопровождения телевизионных передач. Входным сигналом любых каналов вещания всегда является тот или иной акустический процесс — колебания воздушной среды, возбуждаемые различными источниками звука.

Технологический процесс вещания можно разделить на две части:

- 1) подготовку и выпуск программ,
- 2) передачу и распределение, т. е. доведение программ до слушателей.

Подготовка программ включает в себя выбор технического оборудования, необходимого для их передачи в тех или иных условиях исполнения, обеспечение электрическим питанием, организацию и проведение микрофонных репетиций, подготовку и обслуживание средств звукозаписи, а также устройств для контроля и регулирования вещательных сигналов, преобразованных в электрические колебательные процессы. Выпуск программ, т. е. их подача на головные участки каналов распределения, представляет собой совокупность мероприятий, обеспечивающих требуемый уровень сигналов и необходимую степень их помехозащищённости.

Доведение программ до слушателей может осуществляться либо по радиоканалам (индивидуальный или коллективный радиоприём), либо по сетям проводного вещания; во многих случаях те и другие каналы организационно сочетаются друг с другом. К технике вещания относятся, как правило, те части

сквозного канала (от микрофона до громкоговорителя), по которым передаются электрические колебания низкой (звуковой) частоты. В качестве примеров можно назвать: соединительные линии между студией или трансляционным пунктом в театре и радиовещательным передатчиком; соединительные линии между выделенным приёмным пунктом, принимающим программу по радиоканалу, и аппаратной вещательного узла, откуда эта программа подаётся на местную сеть проводного вещания; станционные устройства и сети проводного вещания в городах и сельских местностях. Отметим однако, что в системах многопрограммного проводного вещания применяется и передача модулированных колебаний высокой частоты; такие каналы организационно и технически относятся к службе вещания.

Специальной отраслью техники вещания, привлекающей к себе всё большее и большее внимание, является так называемое радиообслуживание: озвучение больших открытых площадей и закрытых помещений, сети оповещения, звукоусиление (в частности, усиление речей), наконец, системы перевода речей на конференциях и собраниях с многонациональным составом участников.

Краткий обзор задач техники вещания показывает, что она имеет дело, главным образом, с колебаниями звуковой частоты как акустическими, так и электрическими. К компетенции техники вещания относятся такие задачи, как преобразование сигналов из акустической формы в электрическую и, обратно, из электрической формы в звуковую, консервация (запись) программ и их воспроизведение, акустическая обработка различных помещений, предназначенных для исполнения или прослушивания программ, управление характеристиками натуральных звуков (речи и музыки) при передаче или записи, распределение звуковой энергии по занятой слушателями площади и многие другие вопросы, тесно связанные с акустикой. Поэтому изучение техники вещания целесообразно начинать с её акустических основ.

Акустические задачи, выдвигаемые современной техникой вещания, приобретают особенно важное значение в связи с перспективным планом развития радиовещания и телевидения в нашей стране. Развитие УКВ ЧМ вещания, являющееся одной из основных задач, поставленных 7-летним планом развития народного хозяйства СССР в области вещания, заставляет предъявлять всё более и более строгие требования к начальному и конечному звеньям вещательных каналов, т. е. именно к тем звеньям, качественные показатели которых существенно зависят от успешного решения акустических вопросов и от правильного выбора электроакустической аппаратуры.

В этой главе, имеющей характер краткого введения, излагаются некоторые основные сведения, касающиеся физических характеристик звукового поля, и даются определения тех величин, с которыми придётся встретиться в последующих главах.

§ 1.2. Звуковое давление и колебательная скорость

Распространение колебаний в газообразных и жидких средах происходит в форме продольных волн объёмных деформаций, т. е. сжатий и разрежений среды. Область пространства, в которой наблюдаются эти волны, называется звуковым полем. Физическое состояние среды в звуковом поле или, точнее, изменение этого состояния, обусловленное наличием поля, характеризуется обычно одной из двух величин, которые рассматриваются как функции координат и времени:

1) Звуковым давлением (p), т. е. разностью между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдается в среде в отсутствие звукового поля (единица измерения — $\text{дин}/\text{см}^2$, иначе называемая баром). В фазе сжатия звуковое давление положительно, в фазе разрежения — отрицательно.

2) Колебательной скоростью (v), т. е. мгновенным значением скорости колебательного движения частиц среды при распространении в ней звуковой волны (единица измерения — $\text{см}/\text{сек}$). Колебательную скорость принято считать положительной, когда частица движется в направлении распространения волны, и отрицательной при движении частицы в сторону, противоположную направлению распространения.

При колебаниях малой амплитуды, когда изменения полного давления в среде и её плотности прямо пропорциональны друг другу, звуковое давление и колебательная скорость связаны между собой линейной зависимостью. Эта зависимость имеет простейший вид в случае бегущей плоской волны, в поле которой p и v изменяются синфазно:

$$p = \rho cv. \quad (1.1)$$

Здесь ρ — плотность среды,
 c — скорость звука в ней.

Величина ρc , зависящая только от физических свойств среды, называется удельным акустическим сопротивлением. Для воздуха при температуре 20°C и нормальном среднем давлении (760 мм рт. ст. или приближённо 10^6 бар)

$$\rho = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3, \quad c = 3,43 \cdot 10^4 \text{ см}/\text{сек}, \\ \rho c = 41,5 \text{ г}/\text{см}^2\text{сек}.$$

В более общем случае звуковое давление и колебательная скорость изменяются уже не синфазно; при синусоидальных колебаниях линейная связь между p и v может быть представлена в комплексной форме:

$$\frac{p}{v} = \rho c(r' + ix'), \quad (1.2)$$

где r' и x' — безразмерные коэффициенты, зависящие от частоты и от расстояния между источником звука и точкой наблю-

дения. Так, например, можно показать, что в поле расходящейся шаровой волны с угловой частотой ω на расстоянии R от центра возмущения

$$r' = \frac{(kR)^2}{1 + (kR)^2}, \quad x' = \frac{kR}{1 + (kR)^2} \quad (1.3)$$

где

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

есть волновое число. Фазовый сдвиг φ между звуковым давлением и колебательной скоростью¹⁾ определяется формулой

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x'}{r'} = \frac{1}{kR} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{R} \quad (1.4)$$

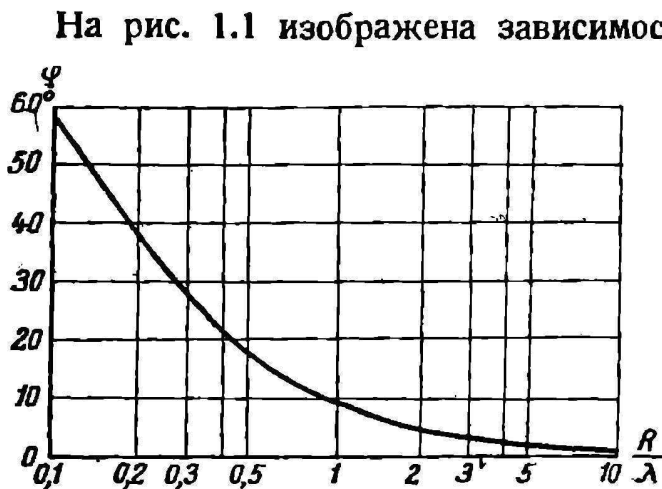


Рис. 1.1. Фазовый сдвиг между звуковым давлением и колебательной скоростью в шаровой волне

На рис. 1.1 изображена зависимость угла φ (в градусах) от R/λ . Из графика видно, что на расстояниях, больших сравнительно с длиной звуковой волны ($R \geq \lambda$), фазовый сдвиг между p и v настолько мал ($\varphi \leq 9^\circ$), что связь между этими величинами с достаточной точностью определяется простой ф-лой (1.1).

Из ф-л (1.3) и (1.4) легко найти, что амплитуды звукового давления (p_m) и колебательной скорости (v_m) в поле

синусоидальной шаровой волны связаны соотношением

$$\frac{p_m}{v_m} = \rho c \sqrt{r'^2 + x'^2} = \rho c \cos \varphi. \quad (1.5)$$

§ 1.3. Энергетические соотношения в звуковом поле

Распространение волнового процесса связано с переносом энергии; в бегущей звуковой волне поток энергии определяется вектором Умова:

$$\mathbf{U} = p\mathbf{v} \quad (1.6)$$

(именно вследствие этого соотношения звуковое давление и колебательная скорость рассматриваются в качестве основных физических характеристик звукового поля). Вектор Умова (1.6) явля-

¹⁾ Причины появления фазового сдвига в поле неплоской волны будут подробно рассмотрены позднее (§ 6.2).

ется, очевидно, функцией времени (как p и v); практически важнейшее значение имеет средняя во времени величина произведения pv

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pv dt. \quad (1.7)$$

Это среднее во времени значение числовой величины вектора Умова называется интенсивностью звука (единица измерения $\text{эрг}/\text{см}^2 \text{сек}$). Интенсивность звука есть среднее количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности, нормальной к направлению распространения волны.

При синусоидальных колебаниях имеем в общем случае

$$p = p_m \sin \omega t, \quad v = v_m \sin (\omega t - \varphi);$$

определяя согласно (1.7) среднее значение pv за период колебания $T = 2\pi/\omega$, найдём

$$I = p_m v_m \left[\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) dt \right] = \frac{p_m v_m}{2} \cos \varphi. \quad (1.8)$$

Для шаровой волны, пользуясь соотношением (1.5), находим

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c} = \frac{1}{2} v_m^2 \rho c \cos \varphi. \quad (1.9a)$$

Определение интенсивности звука через звуковое давление является наиболее удобным, во-первых, вследствие того, что измерение давления осуществляется технически несравненно проще и удобнее, нежели измерение колебательной скорости¹⁾; во-вторых, при этом не нужно знать величины фазового угла φ . Переходя от амплитудного значения (p_m) звукового давления к эффективному ($p_{эфф}$), напишем

$$I = \frac{p_{эфф}^2}{\rho c}. \quad (1.9b)$$

Эта формула применима не только к синусоидальным, но и к любым установившимся акустическим процессам.

Наряду с интенсивностью звука энергетической характеристикой звукового поля является средняя (во времени) плотность звуковой энергии, т. е. энергия, содержащаяся в единице объёма (единица измерения — $\text{эрг}/\text{см}^3$). Согласно теореме Умова объёмная плотность энергии в бегущей звуковой волне

$$\varepsilon = \frac{I}{c} = \frac{p_{эфф}^2}{\rho c^2}. \quad (1.10)$$

¹⁾ Звуковое давление измеряется посредством микрофона с усилителем по показанию измерительного прибора на выходе, проградуированного в барах.

Отметим, что в то время, как понятие интенсивности звука имеет смысл, соответствующий данному выше определению, лишь для бегущих волн, понятие плотности энергии применимо и к полю стоячих волн, где энергия не перемещается в пространстве, а также и в тех случаях, когда волны распространяются во всевозможных направлениях, например, в закрытых помещениях, где волны, отражённые от ограничивающих поверхностей, накладываются друг на друга, имея самые разнообразные направления движения.

§ 1.4. Уровни

В технической акустике принято оценивать интенсивность звука, звуковое давление и плотность энергии чаще всего не в абсолютных, а в относительных логарифмических единицах — децибелах. Измеряемые таким образом величины называются уровнями. Уровень интенсивности звука

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \text{ дб}, \quad (1.11a)$$

где I_0 — интенсивность звука, соответствующая некоторому условно выбираемому нулевому уровню; по международному соглашению выбрана величина

$$I_0 = 10^{-9} \text{ эрг/см}^2\text{сек},$$

приблизённо соответствующая интенсивности едва слышимого звука в частотной области наибольшей чувствительности слуха (см. § 2.5). Соответствующий уровень звукового давления, согласно (1.9 б), определяется формулой

$$N = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \text{ дб}, \quad (1.11б)$$

где p — эффективное давление акустического сигнала,
 p_0 — эффективное давление, соответствующее интенсивности звука I_0 :

$$p_0 = \sqrt{\rho c I_0} \approx 2 \cdot 10^{-4}, \text{ бар}.$$

Наконец, уровень плотности звуковой энергии

$$N = 10 \lg \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \text{ дб}, \quad (1.11в)$$

где

$$\epsilon_0 = \frac{I_0}{c} \approx 3 \cdot 10^{-14}, \text{ эрг/см}^3.$$

Приведённые значения p_0 , I_0 и ϵ_0 , примерно соответствующие минимальным значениям, к которым ещё чувствителен человеческий орган слуха, дают известное представление о малости акустических колебаний и о высокой чувствительности слуха.

Достаточно отметить, что если бы чувствительность органа слуха была на один порядок величин выше, то тепловое движение газовых молекул воздушной среды уже могло бы создавать ощущение шума. Таким образом, чувствительность слуха лежит как раз на пределе биологической целесообразности.

Логарифмические единицы (децибелы) применяются и для оценки уровней электрических сигналов, отображающих акустические процессы. Уровень мощности P вещательных сигналов принято отсчитывать относительно мощности

$$P_0 = 10^{-3} \text{ вт} = 1 \text{ мвт};$$

при таком выборе уровень

$$N = 10 \lg \frac{P}{P_0}, \text{ дб} \quad (1.12)$$

условно называют абсолютным. Так как

$$P = \frac{U^2}{Z} = I^2 Z,$$

где U и I — эффективные значения напряжения и тока, а Z — сопротивление, на котором выделяется мощность P , то

$$N = 10 \lg \frac{U^2}{P_0 Z} = 20 \lg \frac{U}{U_0}, \quad (1.13a)$$

причём

$$U_0 = \sqrt{P_0 Z}.$$

Точно так же можно написать

$$N = 10 \lg \frac{I^2 Z}{P_0} = 20 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (1.13b)$$

где

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{Z}}.$$

При выборе стандартного сопротивления $Z = 600 \text{ ом}^1$ для U_0 и I_0 получаются значения:

$$U_0 = 0,775 \text{ в}, \quad I_0 = 1,29 \text{ ма}.$$

Установим, наконец, соотношения, которыми определяется уровень сложного сигнала, получающегося при сложении двух некогерентных сигналов или при сложении сигнала и шума. Пусть складываются два не интерферирующих друг с другом (некогерентных), сигнала с уровнями N_1 и N_2 . Согласно (1.12),

¹⁾ Эта величина, соответствующая волновому сопротивлению бронзовой воздушной телефонной линии, в которую угольный микрофон отдаёт среднюю мощность, близкую к 1 мвт, перенесена из рекомендаций Международного консультативного комитета по телефонии.

мощности этих сигналов равны

$$P_1 = P_0 10^{0,1N_1}, P_2 = P_0 10^{0,1N_2}.$$

При условии некогерентности мощности сигналов складываются, так что мощность результирующего сигнала будет

$$P = P_1 + P_2 = P_0(10^{0,1N_1} + 10^{0,1N_2})$$

и его уровень оказывается равным

$$N = 10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg (10^{0,1N_1} + 10^{0,1N_2}) = \\ = 10 \lg \{10^{0,1N_1}[1 + 10^{0,1(N_2-N_1)}]\} = N_1 + 10 \lg (1 + 10^{0,1\Delta N}), \quad (1.14a)$$

где $\Delta N = N_2 - N_1$ — разность уровней складываемых сигналов. Представим этот результат в виде

$$N = N_1 + \delta(\Delta N); \quad (1.14b)$$

здесь

$$\delta(\Delta N) = 10 \lg (1 + 10^{0,1\Delta N}), \quad \text{дб} \quad (1.15)$$

— величина, показывающая, на сколько децибелов увеличивается уровень сигнала N_1 при добавлении второго сигнала с уровнем $N_2 = N_1 + \Delta N$.

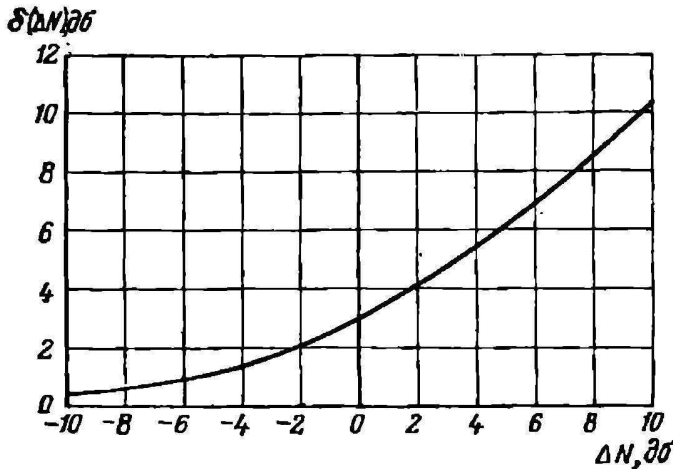


Рис. 1.2. К расчёту уровня при сложении некогерентных сигналов

На рис. 1.2 дан график ф-лы (1.15) для значений ΔN от -10 до $+10$ дб. При $|\Delta N| > 10$ дб можно приближённо считать, что

$$N = N_1 + \Delta N = N_2$$

при $\Delta N > +10$ дб,

$$N = N_1$$

при $\Delta N < -10$ дб.

Отметим, что при сложении двух сигналов равного уровня

$$\delta(\Delta N) = \delta(0) = 10 \lg 2 \approx 3 \text{ дб}.$$

О признаках когерентности или некогерентности сигналов будет подробно сказано в следующей главе.

ВЕЩАТЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ И ИХ ВОСПРИЯТИЕ

§ 2.1. Вещательный сигнал как случайный процесс

Говоря о вещательных сигналах, будем подразумевать акустический или электрический процесс, представляющий вещательную передачу. Это может быть, например, процесс изменения во времени звукового давления в некоторой точке поля источника программы или громкоговорителя, воспроизводящего эту программу; другим примером могут служить переменные во времени напряжение или ток в каком-либо звене низкочастотной части вещательного канала.

Одна из важнейших и наиболее общих характеристик вещательного сигнала, рассматриваемого как процесс, развёртывающийся во времени, заключается в том, что он представляет собой совершенно нерегулярный или, как принято говорить, случайный процесс. В отличие от регулярного (например, периодического) процесса, ход которого однозначно предопределён вплоть до сколь угодно отдалённого будущего, последующее течение случайного процесса (т. е. будущие значения величины, представляющей соответствующий сигнал) не может быть предсказано на основе знания о ходе процесса в прошлом. Значения сигнала, относящиеся к его ближайшему будущему, могут лишь ожидать с той или иной вероятностью; однако связь будущих значений сигнала с прошедшими далеко не однозначна. Характеристика вещательного сигнала как случайного процесса связана с тем, что этот сигнал (как и всякий сигнал связи) непрерывно переносит информацию от её источника к потребителю. Непрерывный перенос информации может иметь место лишь в тех случаях, когда сигнал представляет собой нерегулярный процесс, будущий ход которого заранее не предопределён (или определён не полностью) на приёмной стороне вещательного канала.

При всей нерегулярности вещательных сигналов, представляющих собой как в случае речи, так и в случае музыки случайные колебательные процессы очень сложной формы, некоторые их статистические свойства, имеющие существенный практический интерес, оказываются в достаточной мере устойчивыми и объективно

характеризующими специфические особенности сигналов того или иного типа.

В этой главе будут изложены, во-первых, основные сведения о статистических характеристиках вещательных сигналов (речи и музыки) и, во-вторых, важнейшие данные о слуховом восприятии этих сигналов с учётом специфических условий, встречаемых в технике вещания и радиообслуживания.

§ 2.2. Интерференция сигналов

Во многих случаях технической практики мы встречаемся со сложением двух (или большего числа) сигналов; в большинстве таких случаев возникает вопрос об интерференции складывающихся сигналов, т. е. об их способности усиливать или ослаблять друг друга при сложении. В применении к случайным сигналам вопрос об интерференции требует специального подхода, поскольку здесь нельзя говорить об устойчивых (неизменных во времени) фазовых соотношениях, определяющих интерференционные эффекты при сложении периодических процессов.

Одним из наиболее интересных случаев сложения сигналов является тот случай, когда на сигнал $f(t)$ накладывается его запаздывающее повторение $f(t - \tau)$, где τ — время запаздывания. С таким случаем мы встречаемся, например, при озвучении больших площадей, где можно одновременно слышать два громкоговорителя, воспроизводящих один и тот же сигнал на различных расстояниях от слушателя, при приёме звука двумя микрофонами, работающими на общий усилитель, при отражении звукового сигнала от стены и т. п.

Средняя за время T мощность суммарного сигнала $f(t) + f(t - \tau)$ с точностью до некоторого множителя пропорциональности может быть представлена в виде

$$P_T(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [f(\xi) + f(\xi - \tau)]^2 d\xi = P_1 + P_2 + 2r, \quad (2.1)$$

где

$$P_1(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f^2(\xi) d\xi, \quad P_2(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f^2(\xi - \tau) d\xi \quad (2.2)$$

— средние мощности каждого из складывающихся сигналов и

$$r(\tau, t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\xi) f(\xi - \tau) d\xi \quad (2.3)$$

— величина, которую можно считать мерой когерентности сигнала и его запаздывающегося на время τ повторения. Действительно, если $r = 0$, то

$$P_T(t) = P_1 + P_2,$$