

дБ или не дБ?

Все, что вы хотели знать о децибелах,
но боялись спросить...

Указания по применению

Изделия:

- Генераторы сигналов
- Анализаторы цепей
- Анализаторы спектра
- Измерители мощности
- Тестовые приемники
- Аудиоанализаторы

Верно или нет: $30 \text{ дБмВт} + 30 \text{ дБмВт} = 60 \text{ дБмВт}$? Почему один раз 1% преобразуется к виду -40 дБ, а в другой раз – 0,1 дБ или 0,05 дБ? Эти вопросы иногда заставляют ломать головы даже опытных инженеров. Децибелы встречаются повсюду, в том числе в таких величинах как уровни мощности, напряжения, коэффициенты отражения, коэффициенты шума, напряженности полей и многих других. Что такое децибел и как его следует использовать в своих расчетах? Данные указания к применению позволят вам освежить знания по теме децибелов.



Примечание – Актуальную версию документа см. на нашей веб-странице

<http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA98>

Содержание

1	Введение	4
2	Для чего в расчетах используют децибелы?	5
2.1	Определение дБ	5
2.2	Что означают дБмВт?	6
2.3	В чем отличие децибел по напряжению от децибел по мощности?	7
2.4	Что такое уровень?	8
2.5	Ослабление и усиление	10
2.5.1	Последовательное соединение четырехполюсников:	11
3	Преобразование из децибел в проценты и обратно	12
3.1	Преобразование % напряжения в децибелы и обратно	12
3.2	Преобразование % мощности в децибелы и обратно	13
3.3	Преобразование % превышения или снижения напряжения в децибелы	13
3.4	Преобразование % превышения или снижения мощности в децибелы	14
4	Использование значений, выраженных в дБ, в вычислениях..	15
4.1	Суммирование уровней мощности	15
4.2	Измерение сигналов вблизи порогового шума	15
4.3	Суммирование напряжений	16
4.4	Пиковые напряжения	19
5	Что можно измерить в децибелах?	20
5.1	Отношение сигнал-шум (S/N)	20
5.2	Шум	21
5.3	Усреднение шумовых сигналов	22
5.4	Фактор шума, коэффициент шума	23
5.5	Фазовый шум	24
5.6	S-параметры	26
5.7	КСВН и коэффициент отражения	26
5.8	Напряженность поля	28
5.9	Коэффициент усиления антенны	29
5.10	Пик-фактор (коэффициент амплитуды)	29
5.11	Мощность в канале и в соседнем канале	31
5.12	Качество модуляции (EVM)	32
5.13	Динамический диапазон АЦП и ЦАП	33
5.14	дБ полной шкалы (dBFS)	34
5.15	Уровень звукового давления	34

5.16	Взвешенный уровень звукового давления (dBA).....	35
6	Несколько значений, которые стоит знать	36
6.1	Таблица для преобразования между децибелами и линейными значениями	36
6.2	Таблица для сложения децибел.....	37
6.3	Еще несколько полезных значений	38
6.4	Другие опорные величины.....	38
6.5	Точность, количество знаков после запятой	39
7	Приложения для смартфонов	40
8	Библиография	43

1 Введение

Единицы измерения %, дБ, дБмВт и дБ (мкВ/м) – это важнейшие понятия, которые любой инженер должен осознавать даже во сне. Потому что, если он не может этого делать, в своей сфере деятельности он обязательно будет находиться в невыгодном положении. Когда эти понятия всплывут в дискуссии с клиентами или коллегами, ему будет трудно сосредоточиться на реальной проблеме, если он будет занят, размышляя, означает ли величина 3 дБ коэффициент 2 или 4 (или что-то еще). Поэтому стоит время от времени повторять эти понятия и хорошо ими владеть на постоянной основе.

Хотя настоящие указания по применению не предназначены для использования в качестве учебника, они помогут освежить ваши знания по этой теме, если вы их уже изучали, или обеспечить достойное знакомство с темой, если она для вас является новой.

Когда дело доходило до написания формул и единиц измерения, мы следовали международным стандартам, указанным в документах ISO 31 и IEC 27 (или же мы указывали, когда обычной практикой является отклонение от стандарта).

2 Для чего в расчетах используют децибелы?

В повседневной жизни инженерам приходится иметь дело с числами, и некоторые из этих чисел могут быть очень большими или очень маленькими. В большинстве случаев самым главным является отношение двух величин. Например, базовая станция мобильной радиосвязи может передавать сигнал мощностью приблизительно 80 Вт (с учетом коэффициента усиления антенны). Мобильный телефон получает всего лишь 0,000000002 Вт, что составляет 0,0000000025 % от передаваемой мощности.

Всякий раз, когда приходится иметь дело с большими числовыми диапазонами, удобно использовать логарифмы чисел. Например, базовая станция в нашем примере передает сигнал на уровне 49 дБмВт, в то время как мобильный телефон принимает сигнал с уровнем -57 дБмВт; разница уровней составляет 49 дБмВт – (-57 дБмВт) = 106 дБ.

Другой пример: если собрать каскад из двух усилителей мощности с коэффициентами усиления 12 и 16, соответственно, мы получим общий коэффициент усиления $12 \times 16 = 192$ (который, мы надеемся, вы можете рассчитать в уме – не так ли?). В логарифмических единицах, усилители обладают коэффициентами усиления 10,8 дБ и 12 дБ, соответственно, что дает общий коэффициент усиления 22,8 дБ, который несомненно легче рассчитать.

Можно видеть, что при выражении величин в децибелах их значениями намного легче манипулировать. В уме намного проще складывать и вычитать значения децибел, чем умножать или делить линейные значения. Это главная причина, по которой мы хотим, чтобы наши расчеты проводились в децибелах.

2.1 Определение дБ

Хотя логарифм по основанию 10 отношения двух значений мощности является безразмерной величиной, он выражается в единицах измерения "Бел" в честь изобретателя телефона (Александра Грэхема Белла). Чтобы получить более удобные в применении числа, для вычислительных целей вместо Бел используют единицы дБ (децибел, где "деци" обозначает одну десятую). Необходимо умножить значения в Белах на 10 (так же как мы должны умножить расстояние на 1000, если мы хотим использовать миллиметры вместо метров).

$$a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{ дБ}$$

Как упоминалось выше, преимущество использования децибел состоит в том, что огромный диапазон сигналов, часто встречающихся в области телекоммуникаций и радиотехники, может быть представлен с помощью более удобных в применении чисел.

Пример:

Мощность P_1 равна 200 Вт, а мощность P_2 равна 100 мВт. Каково их соотношение в дБ?

$$a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{ дБ} = 10 \cdot \log_{10}(2000) \text{ дБ} = 33,01 \text{ дБ}$$

Конечно, перед делением этих уровней мощности, необходимо преобразовать их в одинаковые единицы, т. е. Вт или мВт. Мы не получим правильный результат, если просто поделим 200 на 100.

В настоящее время, мы используем почти исключительно логарифмы по основанию 10. Сокращенно логарифм по основанию 10 обозначается **lg**. В старых учебниках можно встретить и натуральный логарифм – это логарифм по основанию *e* (*e* = прил. 2,718). В настоящих указаниях по применению используется только логарифм по основанию 10, для которого применяется сокращение **lg** без указания основания.

Конечно, децибелы можно преобразовать и обратно в линейные величины. Сначала необходимо преобразовать дБ в Бел посредством деления значения на 10. Затем, необходимо возвести число 10 (так как мы используем логарифм по основанию 10) в эту степень:

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{10}}$$

Пример:

$a = 33,01 \text{ дБ}$, чему равно отношение P_1/P_2 ?

После первоначального вычисления $33,01 / 10 = 3,301$ получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{3,301} = 1999,9$$

2.2 Что означают дБмВт?

Если отнести произвольное значение мощности к фиксированной опорной величине, то логарифмическое отношение этих двух величин даст новую абсолютную величину. Эта величина определяется как уровень.

Наиболее часто используемой в области телекоммуникаций и радиотехники опорной величиной является мощность 1 мВт (одна тысячная ватта) на сопротивлении 50 Ом.

Общее отношение мощности P_1 к мощности P_2 станет отношением мощности P_1 к мощности 1 мВт. Логарифмическое отношение даст значение уровня L . По стандарту IEC 27 опорное значение должно быть указано в индексе уровня:

$$L_{P(\text{ре } 1 \text{ мВт})} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБ}$$

или в короткой форме записи:

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБ}$$

Например, мощность 5 мВт соответствует уровню $L_{P/1\text{мВт}} = 6,99 \text{ дБ}$.

Для обозначения отношения к 1 мВт Международный союз электросвязи (МСЭ) ввел единицы измерения **дБмВт (dBm)**. Эти единицы измерения более распространены, чем терминология IEC 27, и в дальнейшем будем пользоваться ими. С учетом сказанного, наш пример гласит следующее:

$$L_P = 10 \cdot \lg \left(\frac{5 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБмВт} = 6,99 \text{ дБмВт}$$

Чтобы получить представление о порядках величин, которые, как правило, встречаются на практике, рассмотрим несколько примеров. Диапазон выходной мощности генераторов сигналов простирается обычно от -140 до +20 дБмВт или от 0,01 фВт (фемтоватт) до 0,1 Вт. Базовые станции мобильной радиосвязи передают сигнал с уровнем +43 дБмВт или мощностью 20 Вт. Мобильные телефоны передают сигнал с уровнем от +10 до +33 дБмВт или от 10 мВт до 2 Вт. Радиовещательные передатчики работают в диапазоне от +70 до +90 дБмВт или от 10 кВт до 1 МВт.

2.3 В чем отличие децибел по напряжению от децибел по мощности?

Во-первых, пожалуйста, забудьте все, что вы когда-либо слышали о децибелах по напряжению и децибелах по мощности. Существует только один тип децибел, и он представляет собой отношение двух уровней мощности P_1 и P_2 . Конечно, любой уровень мощности может быть выражен в виде напряжения, если известно сопротивление.

$$P_1 = \left(\frac{U_1^2}{R_1} \right) \quad \text{и} \quad P_2 = \left(\frac{U_2^2}{R_2} \right)$$

Их логарифмическое отношение можно вычислить следующим образом:

$$a = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{ дБ} = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \text{ дБ}$$

Используя 3 следующих хорошо известных тождества,

$$\log \left(\frac{1}{x} \right) = -\log(x)$$

$$\log(x^y) = y \cdot \log(x)$$

$$\log(xy) = \log(x) + \log(y)$$

получим (снова для логарифма по основанию 10 используем обозначение lg):

$$a = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{ дБ} = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \text{ дБ} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \text{ дБ} - 10 \cdot \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \text{ дБ}$$

Обратите внимание на знак минус перед слагаемым сопротивлений.

В большинстве случаев опорное сопротивление одинаково для обоих уровней мощности, т. е. $R_1 = R_2$.

Так как

$$10 \cdot \lg(1) = 0$$

можем упростить наше выражение следующим образом:

$$a = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ дБ} = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \text{ дБ} \quad (\text{упрощено для } R_1 = R_2!)$$

Получившиеся выражения также объясняют, почему используется множитель $10 \cdot \lg$ для отношения мощностей и $20 \cdot \lg$ для отношения напряжений.

Предостережение (очень важно!): эта формула справедлива только при $R_1 = R_2$. Если, как это иногда происходит в телевизионной технике, необходимо учесть преобразование сопротивлений с 75 Ом в 50 Ом, понадобится рассматривать и отношение сопротивлений.

Обратное преобразование в линейные величины остается таким же, как раньше. Для отношения напряжений, необходимо разделить значение a на 20, так как мы используем U^2 и децибелы ($20 = 2 \cdot 10$, 2 из-за U^2 , 10 из-за деци).

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{10}}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{20}}$$

2.4 Что такое уровень?

Как мы уже видели выше, единицы измерения дБмВт подразумевают отношение к уровню мощности 1 мВт. К другим часто используемым опорным величинам относятся 1 Вт, 1 В, 1 мкВ, а также 1 А или 1 мкА. В соответствии с IEC 27, они обозначаются как дБ(Вт), дБ(В), дБ(мкВ), дБ(А) и дБ(мкА), соответственно, или, при измерении напряженности поля, дБ(Вт/м²), дБ(В/м), дБ(мкВ/м), дБ(А/м) и дБ(мкА/м). Как и в случае дБмВт, обычный способ написания этих единиц измерений согласно ITU выглядит как: дБВт, дБВ, дБмкВ, дБА, дБмкА, дБВт/м², дБВ/м, дБмкВ/м, дБА/м и дБмкА/м. Именно их мы будем использовать в данной работе.

Из относительных значений для уровня мощности P_1 (напряжения U_1), отнесенных к уровню мощности P_2 (напряжению U_2), получим абсолютные значения, используя приведенные выше опорные значения.

Эти абсолютные значения также известны как **уровни**. Уровень 10 дБмВт означает величину, которая на 10 дБ выше 1 мВт, а уровень -17 дБ(мкВ) означает величину, которая на 17 дБ ниже 1 мкВ.

При вычислении этих величин, важно иметь в виду, являются ли они величинами мощности или напряжения.

К величинам мощности относятся, например, мощность, энергия, сопротивление, коэффициент шума и плотность потока мощности.

К величинам напряжения (также известным как полевые величины) относятся напряжение, ток, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля и коэффициент отражения.

Примеры:

Плотность потока мощности 5 Вт/м² имеет следующий уровень:

$$L_{P / 1 \text{ Вт} / \text{м}^2} = 10 \cdot \lg \left[\frac{5 \text{ Вт} / \text{м}^2}{1 \text{ Вт} / \text{м}^2} \right] = 7 \text{ дБ (Вт/м}^2\text{)}$$

Напряжение 7 мкВ также может быть выражено в виде уровня в дБ(мкВ):

$$L_{U / 1 \text{ мкВ}} = 20 \cdot \lg \left[\frac{7 \text{ мкВ}}{1 \text{ мкВ}} \right] = 16,9 \text{ дБ (мкВ)}$$

Для преобразования из уровней в линейные величины необходимы следующие формулы:

$$P = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{10}} \cdot P_{ref}$$

или

$$U = 10^{\frac{u/\text{дБ}}{20}} \cdot U_{ref}$$

Примеры:

Уровень мощности -3 дБ(Вт) соответствует следующей мощности:

$$P = 10^{\frac{-3}{10}} \cdot 1 \text{ Вт} = 0,5 \cdot 1 \text{ Вт} = 500 \text{ мВт}$$

Уровень напряжения 120 дБ(мкВ) соответствует напряжению:

$$U = 10^{\frac{120}{20}} \cdot 1 \text{ мкВ} = 1000000 \cdot 1 \text{ мкВ} = 1 \text{ В}$$

2.5 Ослабление и усиление

Линейная передаточная функция $a_{\text{лин}}$ четырехполюсника (двухпортовой цепи) представляет собой отношение выходной мощности к входной мощности:

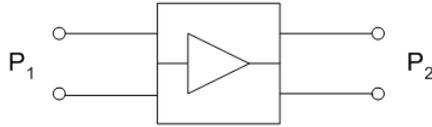


Рисунок 2-1 – Четырехполюсник (двухпортовая цепь)

$$a_{\text{лин}} = \frac{P_2}{P_1}$$

Как правило передаточная функция указывается в дБ:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ дБ}$$

Если выходная мощность P_2 четырехполюсника выше входной мощности P_1 , то логарифмическое отношение P_2 к P_1 будет положительным. Оно называется **усилением** или **приростом**.

Если выходная мощность P_2 четырехполюсника ниже входной мощности P_1 , то логарифмическое отношение P_2 к P_1 будет отрицательным. Оно называется **ослаблением** или **потерями** (знак минус опускается).

При расчете отношения мощностей или отношения напряжений по значению в децибелах используются следующие формулы:

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{10}}$$

или

$$\frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{a/\text{дБ}}{20}} \quad (\text{для } R_{\text{вых}} = R_{\text{вх}})$$

Обычные усилители обеспечивают усиление (коэффициент усиления) до 40 дБ в одном каскаде, которому соответствуют отношения напряжений до 100 и отношения мощностей до 10000. При более высоких значениях существует опасность возникновения колебаний в усилителе. Тем не менее, высокий коэффициент усиления можно получить, подключив последовательно несколько каскадов. Проблему возникновения колебаний можно обойти за счет соответствующего экранирования.

Наиболее распространенные аттенюаторы характеризуются значениями ослабления 3 дБ, 6 дБ, 10 дБ и 20 дБ. Они соответствуют отношениям напряжений 0,7, 0,5, 0,3 и 0,1 или отношениям мощностей 0,5, 0,25, 0,1 и 0,01. Здесь, также, для получения более высоких значений ослабления необходимо включать каскад из нескольких аттенюаторов. Если мы пытаемся получить высокое ослабление в одном каскаде, появляется опасность возникновения перекрестных помех.

2.5.1 Последовательное соединение четырехполюсников:

В случае последовательного соединения (каскадирования) четырехполюсников, можно легко вычислить общий коэффициент усиления (или ослабления) путем сложения значений в децибелах.

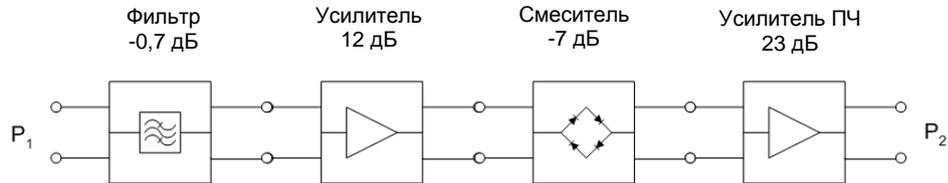


Рисунок 2-2 – Каскадное соединение четырехполюсников

Общий коэффициент усиления вычисляется следующим образом:

$$a = a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

Пример:

На рисунке 2-2 показаны входные каскады приемника. Общий коэффициент усиления a вычисляется следующим образом:

$$a = -0,7 \text{ дБ} + 12 \text{ дБ} - 7 \text{ дБ} + 23 \text{ дБ} = 27,3 \text{ дБ}.$$

3 Преобразование из децибел в проценты и обратно

Термин "процент" происходит от латинского слова и буквально означает "на сотню". 1% означает одну сотую значения.

$$1\% \text{ от } x = 0,01 \cdot x$$

При использовании процентов необходимо задать два вопроса:

- Мы ведем расчет величин напряжения или величин мощности?
- Мы интересуемся процентами $x\%$ величины или процентами $x\%$ превышения или снижения рассматриваемой величины?

Как отмечалось выше, к величинам напряжения относятся, например, напряжение, ток, напряженность поля и коэффициент отражения.

К величинам мощности относятся мощность, сопротивление, коэффициент шума и плотность потока мощности.

3.1 Преобразование % напряжения в децибелы и обратно

Проценты $x\%$ величины напряжения преобразуются в децибелы следующим образом:

$$a = 20 \cdot \lg \frac{x}{100} \text{ дБ}$$

Другими словами: чтобы получить значение $x\%$ в децибелах, сначала необходимо преобразовать процентное значение x в рациональное число путем деления x на 100. Чтобы преобразовать число в децибелы, умножаем логарифм этого рационального числа на 20 (величина напряжения: 20), как показано выше.

Пример:

Предположим, что выходное напряжения четырехполюсника составляет 3% входного напряжения. Каково при этом ослабление в дБ?

$$a = 20 \cdot \lg \frac{3}{100} \text{ дБ} = -30,46 \text{ дБ}$$

Можем преобразовать значение децибел в проценты следующим образом:

$$x = 100\% \cdot 10^{\frac{a/\text{дБ}}{20}}$$

Пример:

Рассчитать выходное напряжение аттенюатора с ослаблением 3 дБ в виде процентов от входного напряжения.

$$x = 100\% \cdot 10^{\frac{-3}{20}} = 70,8\%$$

Выходное напряжение аттенюатора с ослаблением 3 дБ составляет 71% от входного напряжения.

Примечание – Ослабление соответствует отрицательным значениям в децибелах!

3.2 Преобразование % мощности в децибелы и обратно

Проценты $x\%$ величины мощности преобразуются в децибелы следующим образом:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{x}{100} \text{ дБ}$$

Чтобы получить значение в децибелах, необходимо сначала преобразовать процентное значение x в рациональное число (как показано выше) путем деления этого числа на 100. Чтобы преобразовать в децибелы (как описано в разделе 2), умножаем логарифм этого рационального числа на 10 (величина мощности: 10).

Пример:

Предположим, что выходная мощность четырехполюсника составляет 3% входной мощности. Каково при этом ослабление a в дБ?

$$3\% \cdot P = 0,03 \cdot P$$

$$a = 10 \cdot \lg \frac{3}{100} \text{ дБ} = -15,23 \text{ дБ}$$

Мы можем преобразовать значение децибел в проценты следующим образом:

$$x = 100\% \cdot 10^{\frac{a/\text{дБ}}{10}}$$

Пример:

Рассчитать выходную мощность аттенюатора с ослаблением 3 дБ в виде процентов от входной мощности.

$$x = 100\% \cdot 10^{\frac{-3}{10}} = 50,1\%$$

Мощность на выходе аттенюатора с ослаблением 3 дБ наполовину меньше (50%) входной мощности.

Примечание – Как и ранее, ослабление соответствует отрицательным значениям в децибелах!

3.3 Преобразование % превышения или снижения напряжения в децибелы

Проценты $x\%$ превышения (или снижения) значения означают, что мы добавляем (или вычитаем) заданный процент к (или из) начальному значению. Например, если выходное напряжение U_2 усилителя должно быть на $x\%$ больше входного напряжения U_1 , рассчитаем это превышение следующим образом:

$$U_2 = U_1 + x\% \cdot U_1 = U_1 \cdot \left(1 + \frac{x}{100}\right)$$

Если выходное напряжение меньше входного, то x должно быть отрицательным.

Преобразование в децибелы проводится по следующей формуле:

$$a = 20 \cdot \lg \left(1 + \frac{x}{100} \right) \text{ дБ}$$

Примечание – Для величин напряжения используется множитель 20.

Пример:

Выходное напряжение усилителя на 12,2% выше входного. Каково значение коэффициента усиления в децибелах?

$$a = 20 \cdot \lg \left(1 + \frac{12,2}{100} \right) \text{ дБ} = 1 \text{ дБ}$$

Следует иметь в виду, что начиная с даже относительно небольших процентных значений, заданный положительный процент будет соответствовать другому значению в децибелах, нежели соответствующий отрицательный процент.

20% превышение дает +1,58 дБ

20% снижение дает -1,94 дБ

3.4 Преобразование % превышения или снижения мощности в децибелы

Аналогично формуле для напряжения, имеем следующую формулу для мощности:

$$P_2 = P_1 + x\% \cdot P_1 = P_1 \left(1 + \frac{x}{100} \right)$$

Для преобразования в децибелы используется следующая формула:

$$a = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{x}{100} \right) \text{ дБ}$$

Примечание – Для величин мощности используется множитель 10.

Пример:

Выходная мощность аттенюатора на 20% меньше входной. Каково значение ослабления в децибелах?

$$a = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{-20}{100} \right) \text{ дБ} = -0,97 \text{ дБ} \approx -1 \text{ дБ}$$

Как и ранее, можно ожидать асимметричности при выражении значений в децибелах, начиная даже с небольших процентных значений.

4 Использование значений, выраженных в дБ, в вычислениях

В этом разделе показано, как складывать уровни мощности и напряжения в логарифмическом виде, т. е. в децибелах.

4.1 Суммирование уровней мощности

30 дБмВт + 30 дБмВт = 60 дБмВт? Конечно нет! Если преобразовать эти уровни мощности в линейные значения, то очевидно, что 1 Вт + 1 Вт = 2 Вт. А это 33 дБмВт, а не 60 дБмВт. Однако, это справедливо только если суммируемые уровни мощности некоррелированы. *Некоррелированные* означает, что мгновенные значения уровней мощности не имеют фиксированной разности фаз друг с другом.

Примечание – Перед суммированием уровни мощности, выраженные в логарифмических единицах, необходимо преобразовать в линейные величины, которые и будут суммироваться. Если на практике удобнее работать со значениями, выраженными в децибелах, то полученную сумму следует преобразовать обратно в дБмВт.

Пример:

Необходимо просуммировать три сигнала P_1 , P_2 и P_3 с уровнями 0 дБмВт, +3 дБмВт и -6 дБмВт. Каково значение суммарного уровня мощности?

$$P_1 = 10^{\frac{0}{10}} = 1 \text{ мВт}$$

$$P_2 = 10^{\frac{3}{10}} = 2 \text{ мВт}$$

$$P_3 = 10^{\frac{-6}{10}} = 0,25 \text{ мВт}$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 3,25 \text{ мВт}$$

Обратное преобразование в децибелы даст

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{3,25 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБмВт} = 5,12 \text{ дБмВт}$$

Суммарный уровень мощности равен 5,12 дБмВт.

4.2 Измерение сигналов вблизи порогового шума

Одна из наиболее распространенных задач предполагает измерение слабых сигналов вблизи порогового шума измерительного прибора, например, приемника или анализатора спектра. Измерительный прибор отображает суммарное значение собственного шума и мощности сигнала, но, в идеале, он должен отображать только мощность сигнала. Необходимым условием для следующего расчета является то, что измерительный прибор должен отображать среднеквадратическое значение (СКЗ) мощности сигналов. Обычно это условие по умолчанию выполняется для

измерителей мощности, но не для анализаторов спектра, в которых необходимо перейти на СКЗ-детектор.

Во-первых, определяем уровень собственного шума L_r измерительного прибора при выключенном сигнале. Затем измеряем уровень сигнала с шумом $L_{\text{общ}}$. Путем вычитания линейных значений мощности получим мощность P сигнала.

Пример:

Отображаемый уровень шума L_r измерителя мощности равен -70 дБмВт. При подаче сигнала отображаемое значение увеличивается до $L_{\text{общ}} = -65$ дБмВт. Каково значение уровня мощности сигнала в дБмВт?

$$P_r = 10^{\frac{-70}{10}} \text{ мВт} = 0,000\,000\,1 \text{ мВт}$$

$$P_{\text{общ}} = 10^{\frac{-65}{10}} \text{ мВт} = 0,000\,000\,316 \text{ мВт}$$

$$P = P_{\text{общ}} - P_r \quad P = 0,000\,000\,316 \text{ мВт} - 0,000\,000\,1 \text{ мВт} = 0,000\,000\,216 \text{ мВт}$$

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{0,000\,000\,216 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБмВт} = -66,6 \text{ дБмВт}$$

Уровень мощности сигнала составляет $-66,6$ дБмВт.

Можем видеть, что без компенсации шум измерительного прибора вызывает погрешность отображения уровня $1,6$ дБ, что является относительно большой погрешностью для высокоточного измерительного прибора.

4.3 Суммирование напряжений

Точно так же можно суммировать значения в децибелах для величин напряжений, но только при предварительном преобразовании их из логарифмических единиц. Необходимо также знать, коррелированы или нет эти напряжения. Если напряжения коррелированы, необходимо также знать разность фаз напряжений.

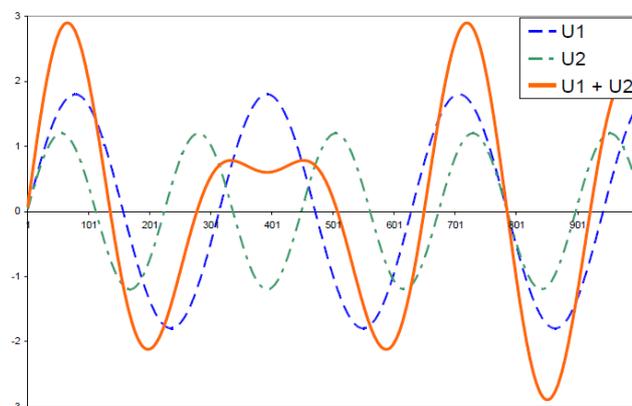


Рисунок 4-1 – Суммирование двух некоррелированных напряжений

Некоррелированные напряжения суммируются квадратично, т.е. на самом деле суммируются соответствующие уровни мощности. Так как сопротивление, на которое подаются напряжения, одинаково для всех сигналов, оно исчезает из формулы:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Если отдельные напряжения заданы в виде уровней, например, в дБ(В), необходимо сначала преобразовать их в линейные значения.

Пример:

Складываем три некоррелированных напряжения $L_1 = 0$ дБ(В), $L_2 = -6$ дБ(В) и $L_3 = +3$ дБ(В) следующим образом, чтобы получить суммарное напряжение U :

$$U_1 = 10^{\frac{U_1/\text{дБ(В)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{0}{20}} \cdot 1 \text{ В} = 1 \text{ В}$$

$$U_2 = 10^{\frac{U_2/\text{дБ(В)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{-6}{20}} \cdot 1 \text{ В} = 0,5 \text{ В}$$

$$U_3 = 10^{\frac{U_3/\text{дБ(В)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{3}{20}} \cdot 1 \text{ В} = 1,41 \text{ В}$$

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 1,41^2} \text{ В} = 1,75 \text{ В}$$

После преобразования U в дБ(В) получим:

$$L_{U/1 \text{ В}} = 20 \cdot \lg \frac{1,75 \text{ В}}{1 \text{ В}} \text{ дБ(В)} = 4,86 \text{ дБ(В)}$$

Если напряжения коррелированы, вычисление становится значительно сложнее. Как можно видеть на следующих рисунках, фазовый угол напряжений определяет общее получающееся напряжение.

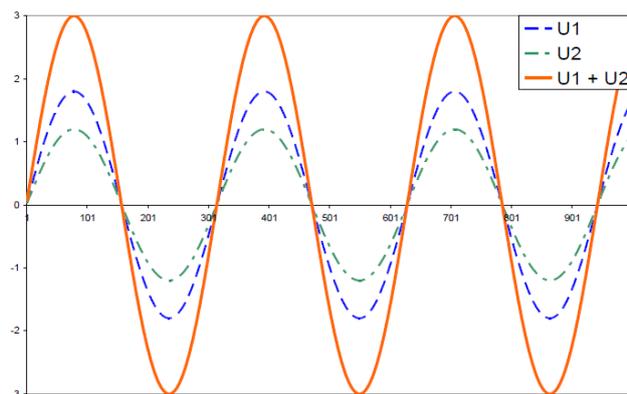
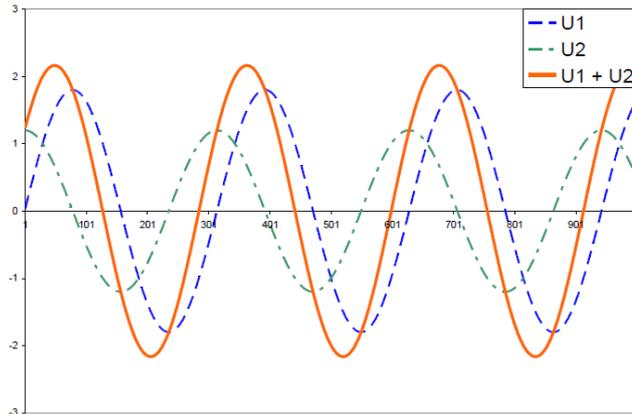
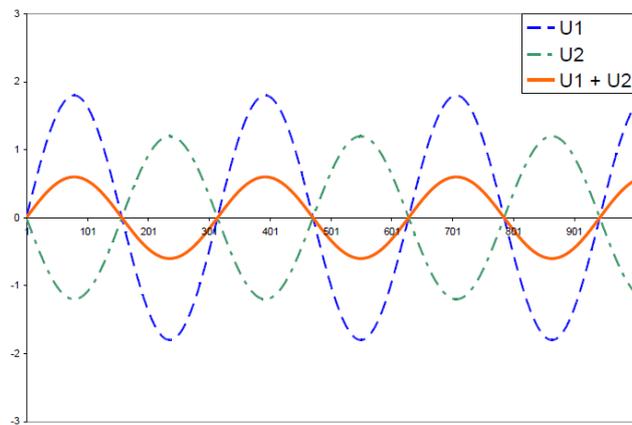


Рисунок 4-2 – Сложение двух коррелированных напряжений, фазовый угол 0°

Синим цветом обозначено напряжение U_1 , зеленым – напряжение U_2 , а красным – общее напряжение U .

Рисунок 4-3 – Сложение двух коррелированных напряжений, фазовый угол 90° Рисунок 4-4 – Сложение двух коррелированных напряжений, фазовый угол 180°

Общее напряжение U лежит в диапазоне от $U_{max} = U_1 + U_2$ для фазового угла 0° (синфазные напряжения) до $U_{min} = U_1 - U_2$ для фазового угла 180° (противофазные напряжения). Для промежуточных фазовых углов необходимо построить векторную сумму напряжений (см. подробности далее).

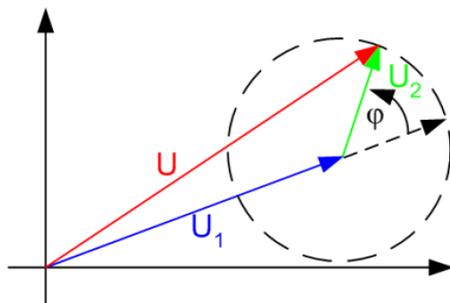


Рисунок 4-5 – Векторное сложение двух напряжений

На практике, как правило, нужно знать только экстремальные значения напряжений, т.е. U_{max} и U_{min} .

Если напряжения U_1 и U_2 представлены в виде значений уровня в дБ (В) или дБ(мкВ), сначала их необходимо преобразовать в линейные величины так же, как это было сделано с некоррелированными напряжениями. Однако сложение будет линейным, а не квадратичным (см. следующий раздел о пиковых напряжениях).

4.4 Пиковые напряжения

При подаче сложного сигнала, состоящего из различных напряжений, на вход усилителя, приемника или анализатора спектра, нам необходимо знать пиковое напряжение. Если пиковое напряжение превышает определенное значение, будут возникать ограничивающие эффекты, которые могут привести к появлению нежелательных комбинационных составляющих или к малой мощности соседнего канала. Пиковое напряжение U равно:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Максимальный задающий уровень для усилителей и анализаторов обычно выражается в дБмВт. В 50-омных системах преобразование на базе пикового напряжения (в В) может быть выполнено по следующей формуле:

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = 10 \cdot \lg \left[\frac{U^2}{50 \text{ Ом}} \cdot 10^3 \right] \text{ дБмВт}$$

Коэффициент 10^3 появляется из-за преобразования ватт в милливатты.

Обратите внимание, что данный уровень мощности представляет собой мгновенное значение пиковой мощности, а не ее среднеквадратическое значение (СКЗ).

5 Что можно измерить в децибелах?

В этом разделе описаны некоторые термины и измеряемые величины, которые обычно указываются в децибелах. Это не исчерпывающий список, и если вы хотите получить больше информации по этой теме, предлагаем вам ознакомиться с приведенной библиографией. Следующие разделы структурированы таким образом, чтобы быть независимыми друг от друга, так чтобы можно было ознакомиться только с необходимой информацией.

5.1 Отношение сигнал-шум (S/N)

Одной из важнейших величин при измерении сигналов является отношение сигнал-шум (S/N). С уменьшением отношения S/N увеличиваются флуктуации измеренных значений. Для определения отношения сигнал-шум сначала измеряется сигнал S, а затем мощность шума N при выключенном или подавленном с помощью фильтра сигнале. Конечно, невозможно измерить сигнал вообще без шума, подразумевается, что мы получим правильные результаты только при хорошем отношении S/N.

$$SN = \frac{S}{N} \text{ дБ}$$

или в дБ:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{S}{N} \text{ дБ}$$

Иногда, в дополнение к шуму, в сигнале также присутствуют гармонические искажения. В таких случаях обычно определяют отношение сигнала к шуму и искажениям (SINAD), а не просто отношение сигнал-шум.

$$SINAD = \frac{S}{N + D}$$

или в дБ:

$$SINAD = 10 \cdot \lg \frac{S}{N + D} \text{ дБ}$$

Пример:

Мы хотим измерить отношение сигнал-шум для FM-приемника. Наш генератор сигналов выполняет модуляцию на частоте 1 кГц с подходящей девиацией. На выходе громкоговорителя приемника мы измеряем уровень мощности 100 мВт, который соответствует мощности и сигнала, и шума. Для определения мощности сигнала необходимо вычесть из этой величины мощность шума, которая будет измерена далее.

Теперь выключаем модуляцию в генераторе сигналов и измеряем мощность шума 0,1 мкВт на выходе приемника. Отношение S/N вычисляется следующим образом:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{100 \text{ мВт} - 0,1 \text{ мкВт}}{0,1 \text{ мкВт}} = 59,99 \text{ дБ}$$

Чтобы определить значение SINAD, мы снова включаем в генераторе сигналов модуляцию на частоте 1 кГц и измеряем (как и ранее) уровень мощности приемника 100 мВт. Теперь мы подавляем сигнал на частоте 1 кГц с помощью узкополосного режекторного фильтра измерительного прибора. Теперь на выходе приемника мы будем измерять шум и гармонические искажения. Если измеренное значение равно, скажем, 0,5 мкВт, мы получим следующее значение SINAD:

$$SINAD = 10 \cdot \lg \frac{100 \text{ мВт} - 0,5 \text{ мкВт}}{0,5 \text{ мкВт}} = 53,01 \text{ дБ}$$

5.2 Шум

Шум вызывается тепловым возбуждением электронов в электрических проводниках. Мощность P , которая может потребляться нагрузкой (например, на входе приемника, усилителя) зависит от температуры T и полосы частот измерения B (не спутайте полосу B с вольтами (В)!).

$$P = k \cdot T \cdot B$$

Здесь, k – постоянная Больцмана $1,38 \times 10^{-23}$ ДжК⁻¹ (Джоулей на Кельвин, 1 Джоуль = 1 Ватт-секунда), T – температура в К (Кельвины, 0 К соответствует $-273,15^\circ\text{C}$ или $-459,67^\circ\text{F}$), а B – ширина полосы частот измерения в Гц.

При комнатной температуре (20°C , 68°F) на один герц полосы пропускания мощность составит:

$$P = k \cdot T \cdot 1 \text{ Гц} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ВтсК}^{-1} \cdot 293,15 \text{ К} \cdot 1 \text{ Гц} = 4,047 \cdot 10^{-21} \text{ Вт}$$

Если преобразовать этот уровень мощности в дБмВт, получим следующее значение:

$$L_{P/1 \text{ мВт}/1 \text{ Гц}} = 10 \cdot \lg \left[\frac{4,047 \cdot 10^{-18} \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right] \text{ дБмВт} = -173,93 \text{ дБмВт/Гц}$$

Мощность теплового шума на входе приемника равна -174 дБмВт на один герц полосы пропускания. Обратите внимание, что этот уровень мощности не является функцией входного импеданса, т. е. он одинаков для 50-, 60- и 75-омных систем.

Уровень мощности пропорционален полосе пропускания B . Используя коэффициент полосы пропускания b в дБ, общую мощность можно вычислить следующим образом:

$$b = 10 \cdot \lg \left[\frac{B}{1 \text{ Гц}} \right] \text{ дБ}$$

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = -174 \text{ дБмВт} + b$$

Пример:

Воображаемый анализатор спектра, который не производит собственного шума, имеет полосу пропускания 1 МГц. Какое значение мощности шума будет отображаться на анализаторе?

$$b = 10 \cdot \lg \left(\frac{1 \text{ МГц}}{1 \text{ Гц}} \right) \text{ дБ} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1000000 \text{ Гц}}{1 \text{ Гц}} \right) \text{ дБ} = 60 \text{ дБ}$$

$$L_{P/1 \text{ мВт}} = -174 \text{ дБмВт} + 60 \text{ дБ} = -114 \text{ дБмВт}$$

Уровень мощности шума, который отображается при комнатной температуре для полосы пропускания 1 МГц, равен -114 дБмВт.

Приемник/анализатор спектра производит шум на 60 дБ больше при полосе пропускания 1 МГц, чем при полосе пропускания 1 Гц. Отображается уровень шума -114 дБмВт. Если необходимо измерять малые амплитуды сигналов, следует уменьшить ширину полосы пропускания. Однако, это возможно только до тех пор, пока не будет достигнута ширина полосы частот сигнала. В определенной степени, можно измерять сигналы, даже если они лежат ниже порогового уровня шума, поскольку каждый дополнительный сигнал увеличивает общую мощность, которая отображается на экране (см. вышеприведенный раздел об измерении сигналов при пороговом шуме). Однако при этом мы быстро достигнем предела разрешения используемого измерительного прибора.

В отдельных специальных областях применения, например, при исследовании дальнего космоса и в астрономии необходимо проводить измерения сверхмалых амплитуд сигналов от космических зондов и звезд. При этом единственно возможное решение подразумевает охлаждение входных каскадов приемника до уровней, близких к абсолютному нулю (-273,15°C или -459,67 F).

5.3 Усреднение шумовых сигналов

Для отображения шумовых сигналов в более стабильном виде обычно включают функцию усреднения, имеющуюся в анализаторах спектра. Большинство анализаторов спектра выполняют обработку сигналов с помощью так называемого детектора отсчетов и усредняют логарифмические значения, отображаемые на экране. Это приводит к появлению систематической погрешности измерения, так как нижние измеренные значения оказывают чрезмерное влияние на отображаемые результаты измерения. На следующем рисунке этот эффект проиллюстрирован на примере сигнала с синусоидальной амплитудной модуляцией.

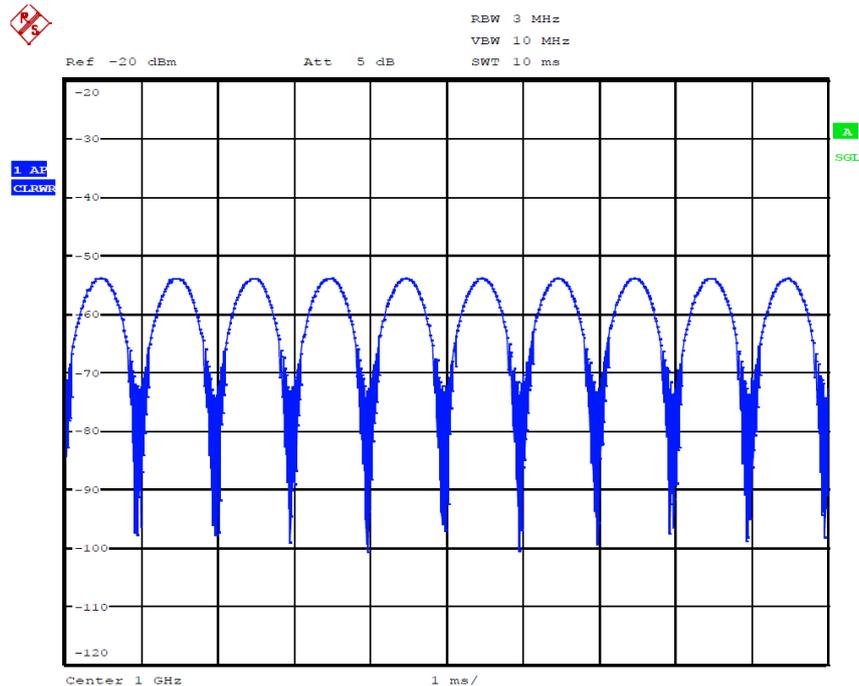


Рисунок 5-1 – Амплитудно-модулированный сигнал: зависимость логарифмических значений амплитуды от времени

Можно видеть, что здесь синусоида искажена и имеет сердцеобразную форму со слишком низким средним значением, на 2,5 дБ ниже. В анализаторах спектра компании R&S используются детекторы среднеквадратического значения, чтобы исключить эту погрешность измерений (см. [4]).

5.4 Фактор шума, коэффициент шума

Фактор шума (шум-фактор) F четырехполюсника определяется как отношение отношения сигнал-шум на входе $SN_{вх}$ к отношению сигнал-шум на выходе $SN_{вых}$.

$$F = \frac{SN_{вх}}{SN_{вых}}$$

Отношение сигнал-шум S/N определяется, как было описано ранее.

Если фактор шума выражается в логарифмических единицах, используется термин *коэффициент шума (NF)*.

$$NF = 10 \cdot \lg \frac{SN_{вх}}{SN_{вых}} \text{ дБ}$$

При определении коэффициента шума для каскадно соединенных четырехполюсников необходимо учитывать определенные нюансы, которые выходят за рамки настоящих указаний по применению. Подробности можно найти в соответствующей технической литературе или в Интернете (см. [3] и [4]).

5.5 Фазовый шум

Идеальный генератор имеет бесконечно узкий спектр. Однако из-за различных физических шумовых воздействий фазовый угол сигнала незначительно изменяется, что приводит к расширению спектра. Это явление называется **фазовым шумом**.

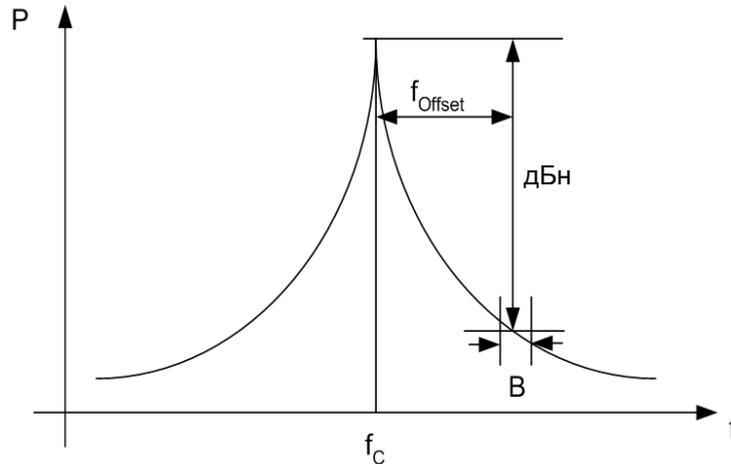


Рисунок 5-2 – Фазовый шум генератора

Чтобы измерить фазовый шум, необходимо определить мощность шумов генератора P_R в виде зависимости от смещения (отстройки) от несущей частоты f_c (так называемой частоты отстройки f_{Offset}) с помощью узкополосного приемника или анализатора спектра в полосе частот B . Затем в ходе вычислений уменьшаем полосу частот измерения B до 1 Гц. Теперь, отнесем эту мощность к мощности несущей P_c для получения результата в дБн (в полосе 1 Гц). Буква "н" в единицах измерения дБн (dBc) обозначает несущую (на англ., с – carrier).

Таким образом, мы получаем фазовый шум, или точнее, уровень фазового шума L в одной боковой полосе (SSB, single sideband):

$$P = 10 \cdot \lg \left[\frac{P_R}{P_c} \cdot \frac{1}{B / 1 \text{ Гц}} \right] \text{ дБн}$$

Обозначение дБн также является нарушением стандарта, однако используется повсеместно. Преобразование в линейные единицы мощности возможно, но не является общепринятым.

В технических данных кварцевых генераторов, генераторов сигналов и анализаторов спектра обычно содержится таблица со значениями уровней фазового шума на разных частотах отстройки. Значения для верхней и нижней боковых полос полагаются одинаковыми.

Таблица 5-1 – Фазовый шум SSB на частоте 640 МГц

Отстройка	Фазовый шум SSB
10 Гц	- 86 дБн (1 Гц)
100 Гц	- 100 дБн (1 Гц)
1 кГц	- 116 дБн (1 Гц)
10 кГц	-123 дБн (1 Гц)
100 кГц	-123 дБн (1 Гц)
1 МГц	-144 дБн (1 Гц)
10 МГц	-160 дБн (1 Гц)

В большинстве технических данных приведены кривые для однополосного фазового шума, которые не спадают также монотонно, как кривые на рисунке 5-2. Это происходит потому, что системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), используемые в современных приборах, "привязывают" генератор к опорному кварцевому генератору, что ведет к улучшению, но, в то же время, и ухудшению зависимости фазового шума от частоты отстройки из-за некоторых конструктивных проблем.

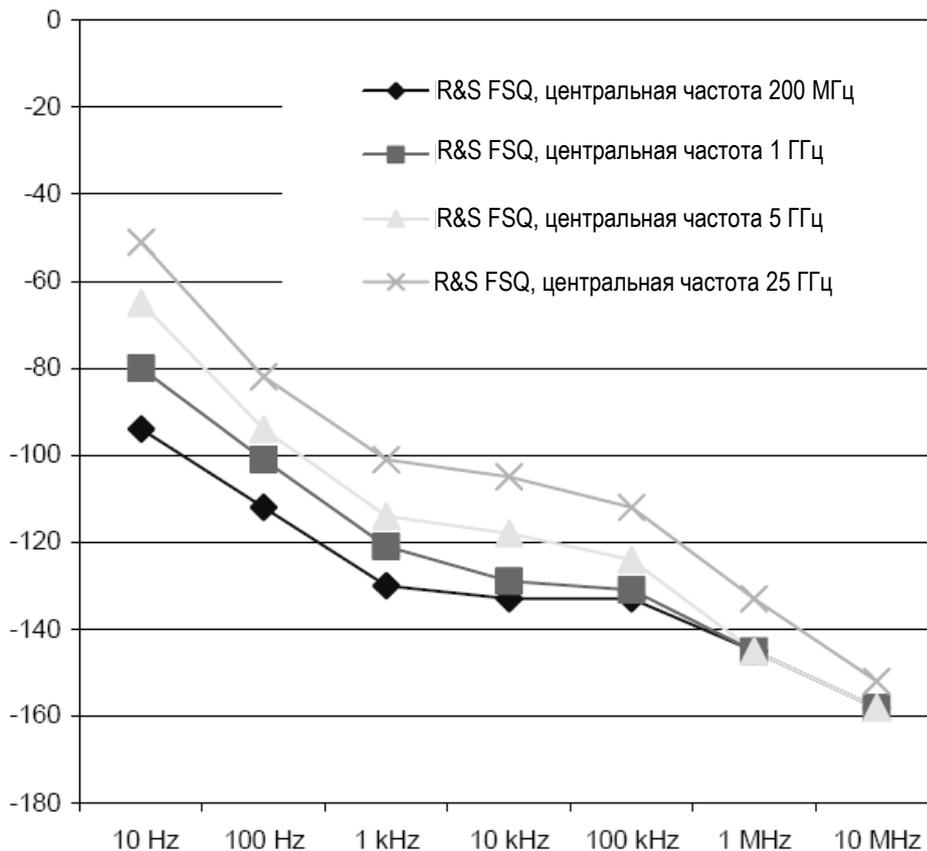


Рисунок 5-3 – Кривые фазового шума для анализатора сигналов R&S®FSQ

При сравнении генераторов, необходимо также рассмотреть значение несущей частоты. Если мы умножаем частоту генератора, используя множитель нулевого шума (что возможно только в теории), коэффициент фазового шума снижается пропорционально напряжению, т.е. если умножить несущую частоту на 10,

фазовый шум увеличится на 20 дБ при той же частоте отстройки. Соответственно, как правило, СВЧ-генераторы всегда хуже, чем ВЧ-генераторы. При смешении (умножении) двух сигналов, уровни мощности шума этих двух сигналов складываются на каждой частоте отстройки.

5.6 S-параметры

Четырехполюсники могут быть охарактеризованы четырьмя параметрами: S_{11} (коэффициент отражения по входу), S_{21} (коэффициент прямой передачи), S_{12} (коэффициент обратной передачи) и S_{22} (коэффициент отражения по выходу).

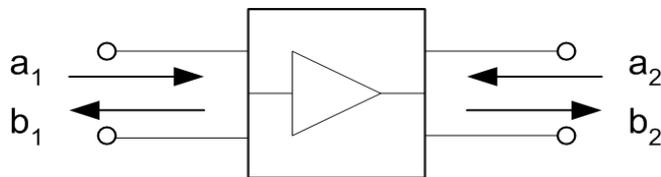


Рисунок 5-4 – S-параметры четырехполюсника

S-параметры могут быть рассчитаны по волновым величинам a_1 , b_1 и a_2 , b_2 следующим образом:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

Волновые величины a и b являются величинами напряжения.

Если S-параметры заданы в виде значений в децибелах, справедливы следующие формулы:

$$\begin{aligned} s_{11} &= 20 \cdot \lg S_{11} \text{ дБ} & s_{21} &= 20 \cdot \lg S_{21} \text{ дБ} \\ s_{12} &= 20 \cdot \lg S_{12} \text{ дБ} & s_{22} &= 20 \cdot \lg S_{22} \text{ дБ} \end{aligned}$$

5.7 КСВН и коэффициент отражения

Как коэффициент отражения, так и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) или коэффициент стоячей волны (КСВ) являются мерой того, насколько хорошо источник сигнала или нагрузка согласован с волновым сопротивлением (импедансом). КСВН принимает значения от 1 до бесконечности и не указывается в децибелах. Однако, коэффициент отражения r в них указывается.

Соотношение между r и КСВН следующее:

$$r = \left| \frac{1 - \text{КСВН}}{1 + \text{КСВН}} \right|$$

$$\text{КСВН} = \left| \frac{1 + r}{1 - r} \right|$$

Для КСВН = 1 (очень хорошее согласование) коэффициент $r = 0$. Для очень высоких значений КСВН коэффициент r приближается к 1 (рассогласование или полное отражение).

Коэффициент r представляет собой отношение двух величин напряжения. Для r в децибелах имеем значение a_r :

$$a_r = 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{1}\right) \text{ дБ} \quad (\text{или наоборот:})$$

$$r = 10^{\frac{a_r/\text{дБ}}{20}}$$

a_r носит название *потери на отражение*.

Для вычисления КСВН по коэффициенту отражения, r берется в виде линейного значения.

В следующей таблице показана связь между КСВН, r и a_r (в дБ). Если нужно получить приблизительное значение r по КСВН, просто разделите десятичную часть КСВН пополам. Это приближение хорошо работает для значений КСВН до 1,2.

Таблица 5-2 – Преобразование из КСВН в коэффициент отражения r и потери на отражение a_r

КСВН	r	a_r [дБ]
1,002	0,001	60
1,004	0,002	54
1,006	0,003	50
1,008	0,004	48
1,01	0,005	46
1,02	0,01	40
1,04	0,02	34
1,1	0,05	26
1,2	0,1	20
1,3	0,13	18
1,4	0,16	15
1,5	0,2	14

Имейте в виду, что для четырехполюсников коэффициент r соответствует коэффициенту отражения по входу S_{11} или по выходу S_{22} .

Аттенюаторы обладают наименьшими коэффициентами отражения. Хорошие аттенюаторы имеют коэффициенты отражения <5% во всем диапазоне до 18 ГГц. Это значение соответствует потерям на отражение > 26 дБ или КСВН < 1,1. Входы измерительных приборов и выходы источников сигналов как правило характеризуются КСВН < 1,5, что соответствует коэффициентам $r < 0,2$ или $a_r > 14$ дБ.

5.8 Напряженность поля

При измерении напряженности поля, обычно используются такие термины, как плотность потока мощности, напряженность электрического поля и напряженность магнитного поля.

Плотность потока мощности S измеряется в Вт/м² или мВт/м². Соответствующими логарифмическими единицами измерения являются дБ(Вт/м²) и дБ(мВт/м²).

$$L_{S / 1 \text{ Вт} / \text{м}^2} = 10 \cdot \lg \left[\frac{S}{1 \text{ Вт} / \text{м}^2} \right] \text{ дБ(Вт/м}^2\text{)}$$

$$L_{S / 1 \text{ мВт} / \text{м}^2} = 10 \cdot \lg \left[\frac{S}{1 \text{ мВт} / \text{м}^2} \right] \text{ дБ(мВт/м}^2\text{)}$$

Напряженность электрического поля E измеряется в В/м или мкВ/м. Соответствующими логарифмическими единицами измерения являются дБ(В/м) и дБ(мкВ/м).

$$L_{E / 1 \text{ В} / \text{м}} = 20 \cdot \lg \left[\frac{E / (\text{В} / \text{м})}{1 / (\text{В} / \text{м})} \right] \text{ дБ(В/м)}$$

$$L_{E / 1 \text{ мкВ} / \text{м}} = 20 \cdot \lg \left[\frac{E / (\text{мкВ} / \text{м})}{1 / (\text{мкВ} / \text{м})} \right] \text{ дБ(мкВ/м)}$$

Преобразование из дБ(В/м) в дБ(мкВ/м) выполняется по следующей формуле:

$$L_{E / 1 \text{ мкВ} / \text{м}} = L_{E / 1 \text{ В} / \text{м}} + 120 \text{ дБ}$$

Добавление 120 дБ соответствует умножению на 10⁶ в линейных единицах.
1 В = 10⁶ мкВ.

Пример:

$$-80 \text{ дБ(В/м)} = -80 \text{ дБ(мкВ/м)} + 120 \text{ дБ} = 40 \text{ дБ(мкВ/м)}$$

Напряженность магнитного поля H измеряется в А/м или мкА/м. Соответствующими логарифмическими единицами измерения являются дБ(А/м) и дБ(мкА/м).

$$L_{H / 1 \text{ А} / \text{м}} = 20 \cdot \lg \left[\frac{H / (\text{А} / \text{м})}{1 / (\text{А} / \text{м})} \right] \text{ дБ(А/м)}$$

$$L_{H / 1 \text{ мкА} / \text{м}} = 20 \cdot \lg \left[\frac{H / (\text{мкА} / \text{м})}{1 / (\text{мкА} / \text{м})} \right] \text{ дБ(мкА/м)}$$

Преобразование из дБ(А/м) в дБ(мкА/м) выполняется по следующей формуле:

$$L_{H / 1 \text{ мкА} / \text{м}} = L_{H / 1 \text{ А} / \text{м}} + 120 \text{ дБ}$$

Пример:

$$20 \text{ дБ(мкА/м)} = 20 \text{ дБ(А/м)} - 120 \text{ дБ} = -100 \text{ дБ(А/м)}$$

Дополнительную информацию по теме напряженности поля см. в [1].

5.9 Коэффициент усиления антенны

Антенны, как правило, ориентируют электромагнитное излучение в определенном направлении. Коэффициент усиления по мощности G , который в результате этого возникает на приемнике, определяется в децибелах по отношению к эталонной антенне. Наиболее распространенными эталонными антеннами являются изотропный излучатель и полуволновый вибратор (диполь). Коэффициент усиления указывается в дБи (dBi) или дБд (dBd). Если необходимо получить коэффициент усиления в линейных единицах измерения, для преобразования можно использовать следующую формулу:

$$G_{\text{лин}} = 10^{\frac{G / \text{дБи}}{10}} \quad \text{или} \quad G_{\text{лин}} = 10^{\frac{G / \text{дБд}}{10}}$$

Более подробно о коэффициенте усиления и КПД антенны см. в [1].

5.10 Крест-фактор

Отношение пиковой мощности к средней тепловой мощности (СКЗ) сигнала называется *пик-фактором* (*коэффициентом амплитуды*). Синусоидальный сигнал имеет амплитудное (пиковое) значение мощности, которое в 2 раза больше среднеквадратического значения мощности, т.е. пик-фактор равен 2, что соответствует 3 дБ.

Для модулированных радиосигналов, крест-фактор относится к пиковому значению модулированной огибающей, а не к пиковому значению сигнала ВЧ несущей. Частотно-модулированный (ЧМ) сигнал имеет постоянную огибающую и, поэтому, пик-фактор равный 1 (0 дБ).

Если мы суммируем множество синусоидальных сигналов, пиковое значение теоретически может увеличиться до суммы отдельных напряжений. Пиковая мощность P_s будет тогда равна:

$$P_s = \frac{(U_1 + U_2 + \dots + U_n)^2}{R}$$

СКЗ мощности P получается путем суммирования отдельных значений мощности:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U_1^2}{R} + \frac{U_2^2}{R} + \dots + \frac{U_n^2}{R}$$

Получим значение крест-фактора C_F следующим образом:

$$C_F = \frac{P_s}{P}$$

$$C_F = 10 \cdot \lg \frac{P_s}{P} \text{ дБ}$$

Чем больше (некоррелированных) сигналов мы суммируем, тем менее вероятно, что будет достигнута общая сумма отдельных напряжений из-за разных фазовых сдвигов. Крест-фактор колеблется вокруг приблизительного уровня 11 дБ. Внешний вид сигнала напоминает шум.

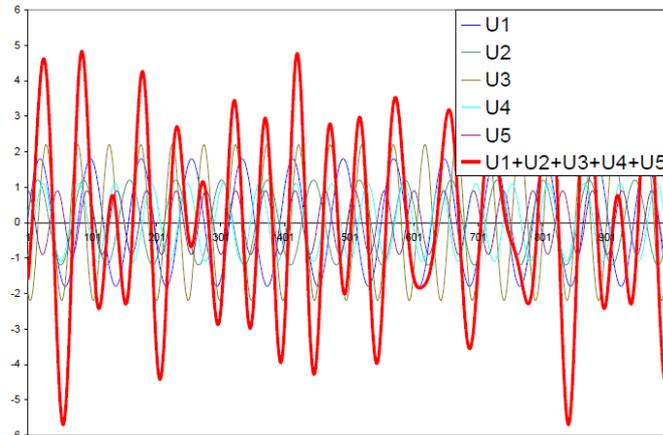


Рисунок 5-5 – Шумоподобный сигнал с пик-фактором 11 дБ

Примеры: Крест-фактор шума равен приблизительно 11 дБ. OFDM-сигналы, которые используются в стандартах DAB, DVB-T и WLAN также имеют крест-факторы, равные приближ. 11 дБ. Сигналы CDMA, предусмотренные стандартами мобильной радиосвязи CDMA2000 и UMTS, имеют крест-факторы вплоть до 15 дБ, но они могут быть снижены до 7-9 дБ с помощью специальных методов, предусматривающих использование данных модуляции. За исключением пакетных сигналов, GSM-сигналы имеют постоянную огибающую из-за MSK-модуляции и, таким образом, крест-фактор 0 дБ. Сигналы стандарта EDGE имеют крест-фактор 3,2 дБ благодаря фильтрующей функции 8PSK-модуляции (также без учета пакетных сигналов).

На [рисунке 5-6](#) показана так называемая дополнительная интегральная функция распределения (CCDF) шумоподобного сигнала. Крест-фактор находится в той точке измерительной кривой, в которой она пересекает ось X. На этом рисунке этой точке соответствует значение приближ. 10,5 дБ.

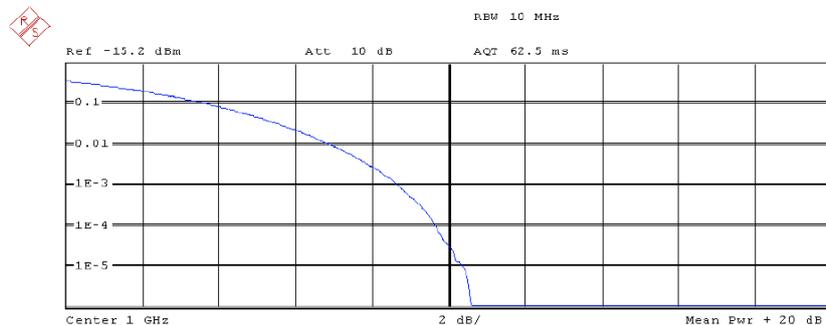


Рисунок 5-6 – Крест-фактор, измеренный с помощью анализатора сигналов R&S® FSQ

5.11 Мощность в канале и в соседнем канале

Современные системы связи, такие как GSM, CDMA2000 и UMTS имеют дело с огромным объемом вызовов. Чтобы избежать возможных сбоев и связанных с этим потерь доходов, важно убедиться, что в полезном канале имеется точно допустимая мощность канала P_{ch} (где "ch" обозначает канал (channel)) и не более. Мощность в полезном канале чаще всего обозначается как уровень L_{ch} в дБмВт.

$$L_{ch / 1 \text{ мВт}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{ch}}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ дБмВт}$$

Обычно он имеет значение 20 Вт или 43 дБмВт.

В соседних каналах мощность не может превышать значение P_{adj} . Это значение коэффициента мощности соседнего канала $ACPR$ (Adjacent Channel Power Ratio) измеряется как отношение к мощности в полезном канале и выражается в дБ.

$$ACPR = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{adj}}{P_{ch}} \right) \text{ дБ}$$

Здесь в непосредственно прилегающих (соседних) каналах должны быть значения мощности от -40 дБ (для мобильных радиоустройств) до -70 дБ (для базовых станций UMTS) и, соответственно, более высокие значения в альтернативных каналах.

При измерении уровней мощности важно учитывать полосу пропускания каналов. Для полезного и соседнего каналов она может различаться. Пример (стандарт CDMA2000): полоса полезного канала 1,2288 МГц, полоса соседнего канала 30 кГц. Иногда, также необходимо выбрать конкретный тип фильтрации модуляции, например, с характеристикой в виде квадратного корня из приподнятого косинуса.

Современные анализаторы спектра оснащены встроенными измерительными функциями, которые автоматически учитывают полосу пропускания полезного канала и соседнего канала, а также фильтрацию. Для получения дополнительной информации см. также [4].

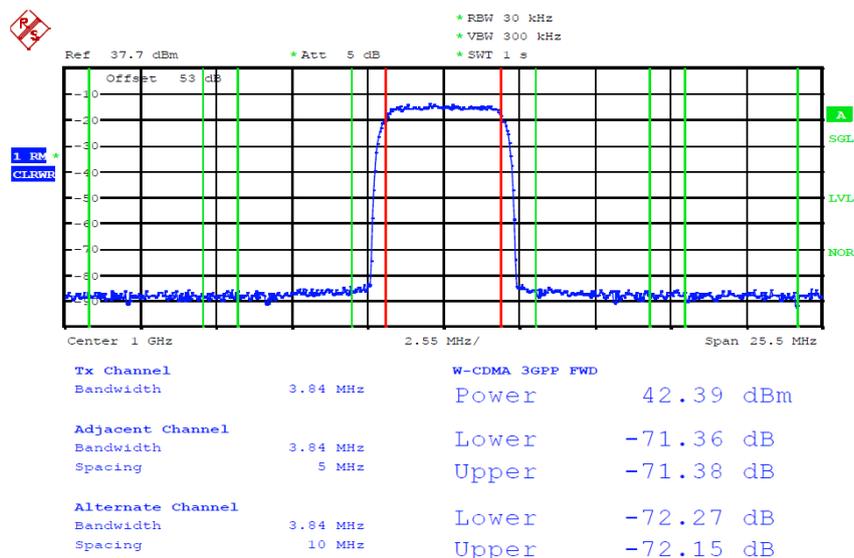


Рисунок 5-7 – Мощность в соседнем канале для сигнала UMTS, измеренная с помощью анализатора сигналов R&S®FSQ

5.12 Качество модуляции (EVM)

В идеале, в приемнике мы хотели бы декодировать сигналы передатчиков с цифровой модуляцией с минимально возможным количеством ошибок. На всем пути передачи сигнала на него неизбежно накладываются шумы и помехи. Из-за этого все более важным требованием к сигналу от передатчика становится его хорошее качество. Одним из показателей такого качества является отклонение от точки идеального сигнального созвездия. Иллюстрация к сказанному приведена на рисунке ниже на примере модуляция QPSK.

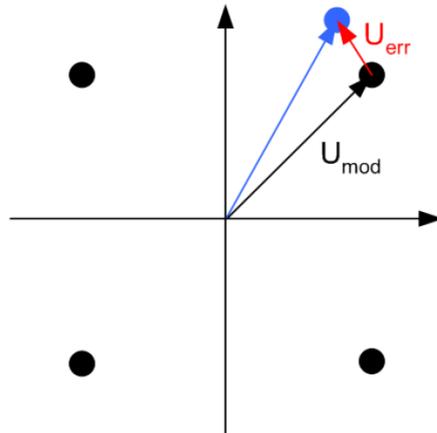


Рисунок 5-8 – Ошибка (погрешность) модуляции

Чтобы определить качество модуляции, ищется отношение модуля вектора ошибки U_{err} к номинальному значению вектора модуляции U_{mod} . Это соотношение известно как векторная ошибка или модуль вектора ошибки (EVM), оно выражается в процентах или в децибелах.

$$EVM_{\text{лин}} = \frac{|U_{err}|}{|U_{mod}|} \cdot 100\%$$

$$EVM = 20 \cdot \lg \left\{ \frac{|U_{err}|}{|U_{mod}|} \right\} \text{ дБ}$$

Различают пиковое значение EVM_{peak} , возникающее за определенный временной интервал, и среднеквадратическое значение ошибки EVM_{RMS} .

Обратите внимание, что эти векторы представляют собой напряжения. Это означает, что при расчетах мы должны использовать множитель $20 \cdot \lg$. Таким образом EVM , равный 0,3%, соответствует уровню -50 дБ.

5.13 Динамический диапазон АЦП и ЦАП

К важнейшим характеристикам аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП) относятся тактовая частота f_{clock} и количество разрядов (битов) данных n . Каждый разряд может означать удвоение (или деление пополам, в зависимости от нашей точки зрения) напряжения. Таким образом, можно получить динамический диапазон D , равный 6 дБ на разряд (как мы уже видели, 6 дБ соответствует коэффициенту 2 для величин напряжения). Имеется также коэффициент умножения системы 1,76 дБ для измерения сигналов синусоидальной формы.

$$D = 20 \cdot \lg(2^n) + 1,76 \text{ дБ}$$

Пример:

16-разрядный ЦАП имеет динамический диапазон 96,3 дБ + 1,76 дБ = 98 дБ.

На практике, АЦП и ЦАП обладают определенными нелинейными характеристиками, которые делают невозможным достижение их полных теоретических значений. Кроме того, джиттер тактового сигнала и динамические эффекты означают, что преобразователи имеют уменьшенный динамический диапазон, особенно на высоких тактовых частотах. Преобразователь затем характеризуется с помощью так называемого динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, или количеством эффективных битов (эффективной разрядностью).

Пример:

8-разрядный АЦП характеризуется эффективной разрядностью 6,3 бита при тактовой частоте 1 ГГц. Таким образом, он имеет динамический диапазон 37,9 дБ + 1,76 дБ = 40 дБ.

На тактовой частоте 1 ГГц АЦП может оцифровывать сигналы с частотой до 500 МГц (частота Найквиста /Котельникова). Если используется лишь малая часть этой полосы частот, фактически можно поднять динамический диапазон с помощью фильтров децимации. Например, 8-разрядный преобразователь может достичь динамического диапазона 60 дБ и более, а не только 50 дБ (= 8 · 6 + 1,76 дБ).

По известному динамическому диапазону можно вычислить эффективную разрядность следующим образом:

$$2^n = 10^{\frac{D / \text{дБ} - 1,76}{20}}$$

Где $n = \log_2(2^n)$ (\log_2 – это логарифм по основанию 2) и

$$\log_2(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(2)} \quad \text{или} \quad \log_{10}(10^x) = x$$

Получаем:

$$n, \text{ бит} = \frac{\log_{10}\left[10^{\frac{D / \text{дБ} - 1,76}{20}}\right]}{\log_{10}(2)} = \frac{D / \text{дБ} - 1,76}{20 \log_{10}(2)} = \frac{D / \text{дБ} - 1,76}{20 \log_{10}(2)}$$

Пример:

Какова эффективная разрядность АЦП с динамическим диапазоном 70 дБ?

Вычислим следующим образом:

$$70 \text{ дБ} - 1,76 \text{ дБ} = 68,2 \text{ дБ}, \text{ а } 20 \log_{10}(2) = 6,02$$

$$68,2 / 6,02 = 11,3$$

Таким образом, получим результат: эффективная разрядность 11,3 бита.

5.14 дБ полной шкалы (dBFS)

Аналого-цифровые преобразователи и цифро-аналоговые преобразователи обладают максимальным динамическим диапазоном, который определяется диапазоном чисел, которые они могут обработать. Например, 8-разрядный АЦП может обрабатывать числа от 0 до $2^8 - 1 = 255$. Это число также известно как значение полной шкалы n_{FS} . Можно определить уровень входного сигнала таких преобразователей как n относительно значения полной шкалы и представить это соотношение логарифмически.

$$a = 20 \cdot \lg \left(\frac{n}{n_{FS}} \right) \text{ дБпш}$$

Пример:

16-разрядный АЦП характеризуется диапазоном значений от 0 до $2^{16} - 1 = 65535$. Если подать на данный преобразователь напряжение, соответствующее числовому значению 32767, получим:

$$a = 20 \cdot \lg \left(\frac{32737}{65535} \right) \text{ дБпш} = -6,02 \text{ дБпш}$$

Если предполагается, что преобразователь способен представлять положительные и отрицательные напряжения, необходимо разделить диапазон значений на два и учесть соответствующее смещение нулевой точки.

5.15 Уровень звукового давления

В области акустических измерений уровень звукового давления L_p измеряется в децибелах. L_p – это логарифмическое отношение звукового давления p к звуковому давлению $p_0 = 20$ мкПа (микropаскаль). Звуковое давление p_0 – это нижний предел давления, который способно воспринимать человеческое ухо в наиболее чувствительном диапазоне частот (около 3 кГц). Это давление известно как порог слышимости.

$$L_p = 20 \cdot \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ дБ}$$

$$p = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot p_0$$

5.16 Взвешенный уровень звукового давления (дБА)

Человеческое ухо обладает довольно выраженной частотной характеристикой (АЧХ), которая также зависит от уровня звукового давления. При измерении звукового давления для моделирования этой АЧХ используются взвешивающие фильтры. Они дают нам значения уровней, которые обеспечивают наиболее близкую имитацию человеческого восприятия громкости по сравнению с невзвешенными уровнями. Разные виды взвешивающих фильтров называются *A, B, C и D*.

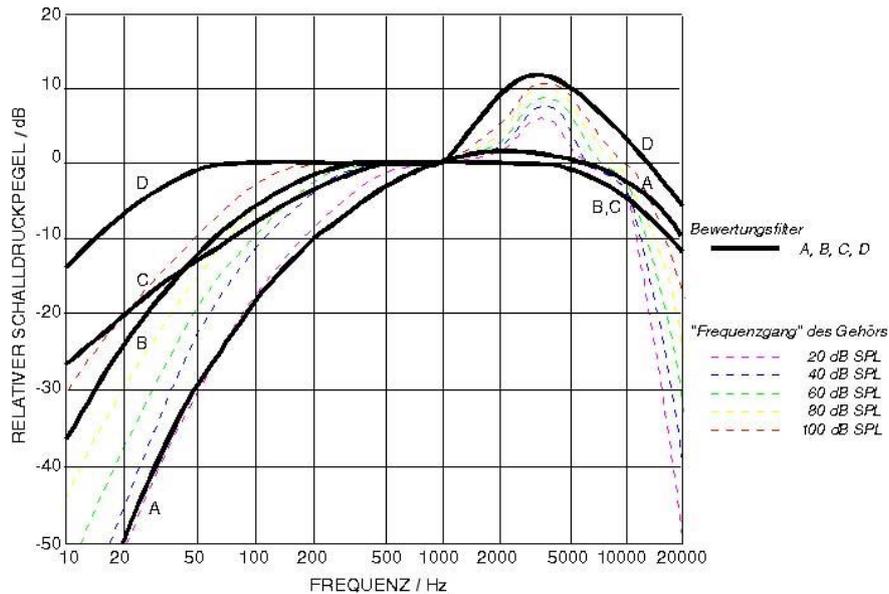


Рисунок 5-9 – Взвешивающие фильтры *A, B, C и D* и АЧХ человеческого уха

Чаще всего используется фильтр *A*. Уровень, измеренный таким способом, называется L_{pA} и выражается в единицах **дБ(A)**, указывая на название взвешивающего фильтра.

Разница в уровне звукового давления на 10 дБ(A) воспринимается как примерное удвоение громкости. Отчетливо слышна разница в 3 дБ(A). Меньшие различия в уровне звука обычно можно распознать только путем прямого сравнения.

Пример:

Наш диапазон слышимости простирается от 0 дБ(A) (порог слышимости) до болевого порога на уровне около 120-134 дБ(A). Уровень звукового давления в очень тихой комнате составляет примерно от 20 до 30 дБ(A). При использовании 16 разрядов данных динамический диапазон музыкального компакт-диска может достигать 98 дБ, что является достаточным, чтобы в полной мере охватить динамический диапазон человеческого уха.

6 Несколько значений, которые стоит знать

Работа с децибелами станет намного проще, если запомнить несколько ключевых значений. С помощью всего нескольких простых значений, при необходимости, вы легко сможете получить другие значения. Можно еще более упростить задачу путем округления точных значений вверх или вниз, чтобы легче запомнить некоторые цифры. Все, что необходимо сделать, это запомнить упрощенные значения, например, коэффициент мощности 2 соответствует 3 дБ (вместо точного значения 3,02 дБ, которое требуется крайне редко).

В следующей таблице перечислены некоторые из наиболее полезных значений для запоминания.

6.1 Таблица для преобразования между децибелами и линейными значениями

Таблица 6-1 – Преобразование между децибелами и линейными значениями

Значение дБ	Отношение мощностей		Отношение напряжений	
	Приблиз.	Точное	Приблиз.	Точное
0,1 дБ	±2 %	+2,3 % -2,3%	±1 %	+1,16 % -1,15 %
0,2 дБ	±4 %	+4,7 % -4,5 %	±2%	+2,33 % -2,23 %
0,5 дБ	±10 %	+12,2 % -10,9 %	±5 %	+5,9 % -5,5 %
1 дБ	± 20 %	+25,9 % -20,5 %	±10 %	+12,2 % -11,9 %
3 дБ	2 0,5	1,995 0,501	1,4 0,7	1,412 0,798
3,02 дБ	2 0,5	2,0 0,5	1,414 0,707	$\sqrt{2}$ $1/\sqrt{2}$
5 дБ	3 0,33	3,16 0,316	1,8 0,6	1,778 0,562
6 дБ	4 0,25	3,98 0,25	2 0,5	1,995 0,501
10 дБ	10 0,1	10 0,1	3 0,3	3,162 0,316
20 дБ	100 0,01	100 0,01	10 0,1	10 0,1
40 дБ	10000 0,0001	10000 0,0001	100 0,01	100 0,01
60 дБ	1000000 0,000001	1000000 0,000001	1000 0,001	1000 0,001

Из этой таблицы, возможно, следует знать наизусть хотя бы приблизительные значения для 3 дБ, 6 дБ, 10 дБ и 20 дБ.

Примечание – 3 дБ не является точным отношением мощностей равным 2, а 6 дБ – это точно не 4! Тем не менее, эти упрощения обеспечивают достаточную точность для повседневного использования и, фактически, обычно так и используются.

Промежуточные значения, которых нет в таблице, можно легко получить:

4 дБ = 3 дБ + 1 дБ, соответствует коэффициенту 2 + 20% мощности, т.е. приблизительно 2,4-кратному значению мощности.

7 дБ = 10 дБ – 3 дБ, соответствует 10-кратной мощности и еще половине, т.е. 5-кратной мощности.

6.2 Таблица для сложения децибел

Если нужно точно вычислить сумму двух значений, указанных в децибелах, необходимо преобразовать их в линейную форму, сложить их, а потом преобразовать обратно в логарифмическую форму. Тем не менее, следующая таблица может быть полезной для проведения быстрых вычислений. Столбец 1 с названием "Разность, дБ" содержит разности двух значений в дБ. Столбец 2 содержит поправочный коэффициент для величин мощности. Столбец 3 содержит поправочный коэффициент для величин напряжения. Чтобы получить общее значение, следует добавить поправочный коэффициент к большему из двух значений в дБ.

Таблица 6-2 – Поправочные коэффициенты для сложения значений в децибелах

Разность, дБ	Мощность	Напряжение
0	3,01	6,02
1	2,54	5,53
2	2,12	5,08
3	1,76	4,65
4	1,46	4,25
5	1,19	3,88
6	0,97	3,53
7	0,79	3,21
8	0,64	2,91
9	0,51	2,64
10	0,41	2,39
11	0,33	2,16
12	0,27	1,95
13	0,21	1,75
14	0,17	1,58
15	0,14	1,42
16	0,11	1,28
17	0,09	1,15
18	0,07	1,03
19	0,05	0,92
20	0,04	0,83

Пример:

1. Предположим, нужно сложить уровни мощности -60 дБмВт и -66 дБмВт. Вычитаем значения децибел, чтобы получить разницу 6 дБ. Из таблицы считываем поправочный коэффициент $0,97$ дБ. Добавляем это значение к большему из двух значений, т.е. к -60 дБмВт (-60 дБмВт больше, чем -65 дБмВт!) и получаем суммарную мощность -59 дБмВт.
2. При включении сигнала, шум, отображаемый на анализаторе спектра, увеличивается на $0,04$ дБ. Из таблицы видим, что уровень этого сигнала лежит примерно на 20 дБ ниже уровня шума анализатора спектра.
3. Нужно сложить два одинаковых напряжения. Это означает, что разность уровней составит 0 дБ. Общее напряжение лежит на 6 дБ (значение из таблицы) выше значения одного напряжения (т.е. ему соответствует в два раза большее напряжение).

6.3 Еще несколько полезных значений

Во многих обстоятельствах будут также полезны следующие значения:

- ┆ 13 дБмВт соответствуют напряжению $U_{скз} = 1$ В на сопротивлении 50 Ом
- ┆ 0 дБмВт соответствуют напряжению $U_{скз} = 0,224$ В на сопротивлении 50 Ом
- ┆ 107 дБ(мкВ) соответствуют уровню 0 дБмВт на сопротивлении 50 Ом
- ┆ 120 дБ(мкВ) соответствуют напряжению 1 В
- ┆ -174 дБмВт – это мощность теплового шума в полосе 1 Гц при температуре приближ. 20 °C (68 °F).

6.4 Другие опорные величины

До сих пор в качестве опорных величин мы использовали значения 1 мВт и 50 Ом. Однако существуют и другие системы отсчета, среди которых самыми главными являются 75 -омные системы в телевизионной технике и 600 -омные системы в акустической измерительной технике. 60 -омная система, ранее используемая в радиотехнике, и 600 -омная система в Соединенных Штатах с опорным значением $1,66$ мВт сейчас используются довольно редко. Тем не менее, нетрудно адаптировать приведенные выше формулы к этим системам отсчета.

Таблица 6-3 – Дополнительные системы отсчета

R	P_0	U_0	Примечание
50 Ом	1 мВт	0,224 В	Радиотехника
60 Ом	1 мВт	0,245 В	Радиотехника (устар.)
75 Ом	1 мВт	0,274 В	Телевизионная техника
600 Ом	1 мВт	0,775 В	Акустика
600 Ом	1,66 мВт	1,000 В	Стандарт США

6.5 Точность, количество знаков после запятой

Сколько десятичных знаков следует использовать при указании значения в децибелах?

Если увеличить значение x , которое является величиной мощности, указанной в децибелах, на 0,01 дБ, то соответствующее ему линейное значение изменится следующим образом:

$$x \text{ дБ} + 0,01 \text{ дБ} \equiv 10^{\frac{x+0,01}{10}} = 10^{\frac{x}{10}} \cdot 10^{\frac{0,01}{10}} = 10^{\frac{x}{10}} \cdot 1,0023$$

Это эквивалентно изменению мощности на 0,23%. Величины напряжения изменятся только на 0,11%. Эти незначительные изменения невозможно отличить от обычных флуктуаций результата измерения.

Соответственно, не имеет смысла указывать значения в децибелах с точностью, скажем, пяти или более знаков после запятой, за исключением нескольких редких случаев.

7 Приложения для смартфонов

Чтобы облегчить вычисления, рассмотренные в предыдущих главах, компания Rohde & Schwarz предлагает широкий спектр соответствующих приложений для планшетов и смартфонов.

В настоящее время на соответствующих порталах приложений бесплатно доступны версии для Android, iOS и Windows Phone. Чтобы быстро найти эти приложения, используйте для поиска ключевые слова "Rohde", "Schwarz" и "dB", "Calculator" или "Field Strength" и "Estimator". Если вы читаете этот документ на смарт-устройстве, просто нажмите на приведенную ссылку, чтобы получить прямой доступ к странице приложения Rohde & Schwarz.

1. dB Calculator (Калькулятор дБ)

Приложение *dB Calculator* состоит из пяти независимых инструментов расчета. *dBmCalculator* (калькулятор дБмВт), *VoltageCalculator* (калькулятор напряжений), *UnitConverter* (преобразователь единиц измерения), *RatioConverter* (преобразователь отношений) и *VSWRConverter* (преобразователь КСВН).

- **Android:**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rohdeschwarz.dbcalculator>
- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/app/dbcalculator/id489100786>
- **Windows Phone:**
<http://windowsphone.com/s?appId=8d9ec5b8-b351-4dbb-8c06-017678b18788>

2. Pulsed RF Calculator (Калькулятор импульсных ВЧ-сигналов)

Современные анализаторы спектра, такие как R&S®FSW, оснащены самыми совершенными инструментами для решения этой измерительной задачи. Если такой анализатор не доступен, приложение *Pulsed RF Calculator* может помочь пользователю найти соответствующие настройки анализатора спектра и рассчитать так называемое падение импульсной чувствительности для правильного измерения амплитуд импульсных сигналов.

- **Android: (скоро выйдет)**
- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/app/pulsed-rf-calculator/id969034080>
- **Windows Phone: (скоро выйдет)**

3. FieldStrength & PowerEstimator (Программа оценки мощности и напряженности поля)

Данное приложение вычисляет плотность потока мощности, напряженность электрического и магнитного полей по переданной мощности, соответствующей частоте и коэффициенту усиления передающей антенны.

Кроме того, по коэффициенту усиления приемной антенны вычисляется входная мощность на приемнике с 50-омным входным импедансом.

Приложение автоматически преобразует плотность потока мощности в напряженность электрического и магнитного поля.

В зависимости от частоты передачи, на принимаемую мощность и напряженность поля влияют различные параметры, такие как распространение в условиях отсутствия прямой видимости, изменение поляризации, отражения и многолучевое распространение. Кроме того, необходимо учесть КСВН антенны и потери в кабелях.

Программа оценки мощности и напряженности поля не учитывает эти искажения. В ней предполагается, что условия близки к наиболее вероятным теоретическим значениям. Именно поэтому программа называется программой оценки, а не калькулятором.

- **Android:**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rohdeschwarz.android.powere estimator>
- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/app/field-strength-power-estimator/id364229792>
- **Windows Phone:**
<http://windowsphone.com/s?appld=0c968ef4-4179-493a-8d86-1da29228157e>

4. Power Viewer Mobile (Мобильный измеритель мощности)

С помощью этого приложения можно работать с датчиками мощности компании Rohde&Schwarz R&S®NRP-Z с помощью смартфона или планшета с ОС Android.

- **Android:**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rohdeschwarz.android.nrpdriver>

5. Wireless Communication Calculator (Калькулятор беспроводной связи)

Приложение-калькулятор беспроводных сетей от компании Rohde & Schwarz является неотъемлемой частью инструментария любого инженера беспроводной связи. Благодаря поддержке всех сегодняшних важнейших и популярных стандартов сотовой и не сотовой связи, охвачены все технологии, начиная от А и заканчивая Zigbee. Вам достаточно ввести название технологии и интересующую полосу частот, а мы сделаем все остальное. Введите номер канала, и мы сообщим правильные частоты нисходящего и восходящего каналов как в числовой, так и в графической форме. Также будет приведена краткая справка о нижнем, среднем и верхнем каналах. В режиме "мощности", мы сообщим вам максимальную мощность абонентского устройства, разрешенную для устройств данного класса, или, в случае GSM, зависимость мощности от PCL/Гамма.

- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/app/wireless-communication-calculator/id544183863>

6. Aviation RF Link (Авиационная радиосвязь)

Приложение *Aviation RF Link* позволяет быстро рассчитать прямой канал связи от наземной станции до воздушного судна. На основании ВЧ мощности наземной станции инструмент вычисляет расстояние при заданной напряженности поля, которая должна быть достигнута в антенне воздушного судна, или рассчитывает напряженность поля при заданных мощности и расстоянии до самолета.

Инструмент вычисляет потери в канале на базе условий прямой видимости LOS и не учитывает многолучевое распространение на земле.

В дополнение к ВЧ-каналу, программа вычисляет радиогоризонт по заданной высоте самолета и наземной станции. Если расчетная линия прямой видимости (*LOS*) меньше, чем расстояние, которое может быть достигнуто при заданных радиоусловиях, оно обозначается красной точкой на вкладке *LOS*. В этом случае ограничивающим фактором будет являться радиогоризонт, а не бюджет (энергетический потенциал) ВЧ-канала.

Линия прямой видимости рассчитывается в соответствии с Приложением 10 конвенции ИКАО, том 5.

Стандартный для антенны коэффициент усиления 2,14 дБи соответствует всенаправленной антенне.

По умолчанию напряженность поля 75 мкВ/м соответствует рекомендации ИКАО для минимального уровня приема на антенне воздушного судна.

- **Android:**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=eu.tarienna.android.aviationlink>
- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/app/aviation-rf-link/id421145880?mt=8>

Чтобы проверить остальные доступные приложения от компании Rohde & Schwarz на разных порталах приложений, просто перейдите по следующим ссылкам, в зависимости от используемого устройства.

- **Android:**
<https://play.google.com/store/apps/developer?id=Rohde+%26+Schwarz+GmbH+%26+Co.+KG>
- **iOS:**
<https://itunes.apple.com/de/artist/rohde-schwarz-gmbh-co.-kg/id364229795>
- **Windows Phone:**
<https://www.windowsphone.com/en-US/store/publishers?publisherId=Rohde%2B%2526%2BSchwarz%2BGmbH%2B%2526%2BCo.%2BKG>

Примечание – Для приложений на iPad и iPhone ссылки отличаются.

8 Библиография

1. Field Strength and Power Estimator, Application Note 1MA85, Rohde & Schwarz GmbH &Co. KG [1MA85](#)
2. R&S dB Calculator, Application Note 1GP77, Rohde & Schwarz GmbH &Co. KG [1GP77](#)
3. Подробное описание терминов, которые используются в настоящих указаниях по применению, см. также на сайте www.wikipedia.org.
4. Christoph Rauscher, Fundamentals of Spectrum Analysis, Rohde & Schwarz GmbH&Co. KG, PW 0002.6629.00
5. [Correct usage of quantities, units and equations](#), Brochure, Rohde & Schwarz GmbH &Co. KG, 2012

О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой группу электронных компаний, предлагающую инновационные решения в следующих сферах деятельности: контрольно-измерительное оборудование, теле- и радиовещание, защищенная связь, кибербезопасность, радиомониторинг и радиолокация. Созданная более 80 лет назад эта независимая группа компаний представлена по всему миру и имеет собственную торгово-сервисную сеть более чем в 70 странах.

Компания занимает лидирующие позиции на мировом рынке в своих областях деятельности. Штаб-квартира компании расположена в г. Мюнхен (Германия). Региональные штаб-квартиры компании расположены в Сингапуре и в Колумбии (США, штат Мэриленд), они осуществляют управление деятельностью компании в этих регионах.

Представительство в Москве:

115093 Москва, ул. Павловская, 7, стр.1, этаж 5
тел. +7 (495) 981 35 60, факс +7 (495) 981 35 65
info.russia@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.ru

Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток

+49 89 4129 12345

customersupport@rohde-schwarz.com

Северная Америка

1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)

customer.support@rsa.rohde-schwarz.com

Латинская Америка

+1-410-910-7988

customersupport.la@rohde-schwarz.com

Азия/Тихий океан

+65 65 13 04 88

customersupport.asia@rohde-schwarz.com

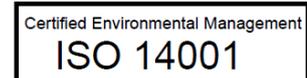
Китай

+86-800-810-8228 /+86-400-650-5896

customersupport.china@rohde-schwarz.com

Ресурсосберегающие методы проектирования

- Экологическая безопасность и экологический след
- Энергоэффективность и низкий уровень выбросов
- Долгий срок службы и оптимизированные производственные расходы



Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München

Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com