

Почему этот диапазон? В принципе, многое из сказанного можно отнести и к другим СВЧ диапазонам с некоторыми корректировками. Постараюсь все написать так, чтобы из текста было ясно, какие моменты критичны или чувствительны к диапазону, а какие нет.

Занимался этим диапазоном последние несколько лет. Он оптимален для DX-связей на СВЧ: поглощение этих частот в атмосфере сравнительно невысокое, уровень рассеяния на осадках по сравнению с более низкочастотными диапазонами (5.7 GHz) выше, улучшение тропосферного рассеяния при грозах делают его привлекательным для наземной связи. Шум неба на этом диапазоне невелик, не намного хуже по сравнению с диапазоном 1296 MHz, в основном, за счет несколько больших потерь в атмосфере. При этом на 10 GHz практически нет промышленных помех и шумов, мобильной связи, GSM, Wi-Fi и т.п., а используемые антенны узконаправленные, обычно параболические. Деграция на EME трассе на этом диапазоне выше, а доплеровский сдвиг больше, однако первое компенсируется большим усилением парабол при тех же или даже меньших размерах. В общем, диапазон 10 GHz кажется привлекательным для работы, если, стартуя с 23 см, двигаться вверх по частоте.

Отсутствие промышленных помех снижает требования к приемным устройствам, МШУ, наличию дополнительных узкополосных фильтров в трактах приема и их динамике. За исключением одного фактора, коэффициента шума. Прием слабых сигналов на любом диапазоне определяется чувствительностью системы, и ее улучшение за счет снижения коэффициента шума приемника это первый и сравнительно недорогой способ двигаться в этом направлении.

Ориентиры по коэффициенту шума на сегодня это цифры 0.7 dB для EME LNA от DB6NT, современные полевые транзисторы могут по заявленным в их datasheets параметрам достичь цифр $NF_{min}=0.35$ dB у их затвора (с deembedding, т.е. без учета потерь во входных цепях и за стоком транзистора). Т.е. если стараться улучшить показатели 0.7 dB, то речь может идти о десятых dB.

Попытка улучшить коэффициент шума на десятые dB сталкивается с проблемой измерения, погрешность шумомеров оказывается порядка тех самых десятых, которые мы хотели бы отыграть. На рис. 1 показаны результаты Uncertainty Calculator от Rohde&Schwarz¹ для сравнительно благоприятного случая измерений коэффициента шума.

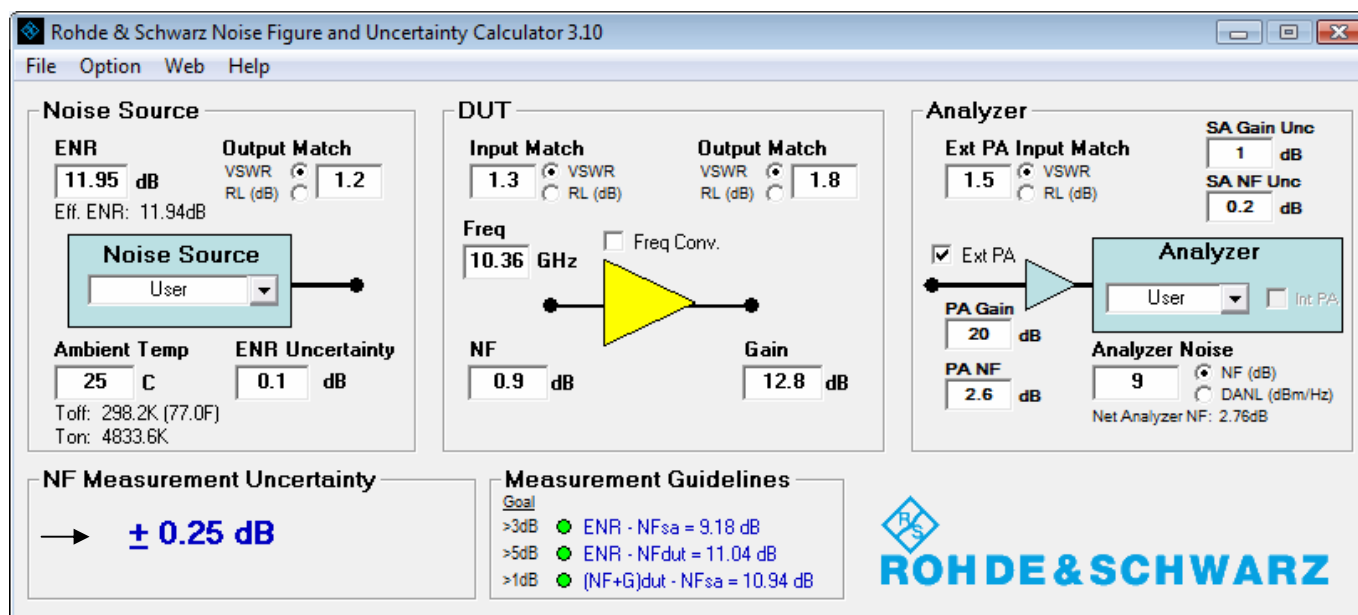


Рис. 1. Результаты вычислений погрешности измерений коэффициента шума с калькулятором Rohde&Schwarz.

¹ См. описание калькулятора в препринте http://www.rohde-schwarz.cz/file/1MA178_1E_the_Y_factor_technique.pdf и саму программу http://www.rohde-schwarz.cz/file/NF_UncertaintyCalc_v310.exe. Регистрация программы бесплатная.

Что нужно вводить в качестве исходных данных для расчета в основном понятно, как считается погрешность можно посмотреть в препринте Rohde&Shwarz. Вопрос у меня вызвала только цифра «SA NF Unc», результат оказывается довольно чувствительным к ней. Она отражает неопределенность коэффициента шума измерителя, т.е. следующего за измеряемым устройством DUT каскада в тракте, внешний усилитель «Ext PA» для снижения коэффициента шума измерителя был включен. Брал ее исходя из результата калькулятора, когда все касающиеся DUT цифры (NF, Gain) нулевые, а VSWR DUT единичные, т.е. как ошибку в определении NF измерителя-анализатора при его калибровке. Но вне зависимости от этой цифры понятно, что на погрешности измерений в целом влияет и погрешность калибровки ENR источника шума, причем, напрямую, влияет рассогласование источника и измеряемого DUT, а добиться хорошего KCB источника на 10 GHz сложнее, чем на более низких частотах. И речь будет идти о погрешности порядка десятых dB.

Путь улучшить точность измерений, причем, осуществимый не только в специализированных лабораториях – это использование «холодного рупора» RW3BP² и метода Y-фактора с «горячей» и «холодной» шумовыми температурами на входе рупора или измеряемого устройства. Уже первые эксперименты с измерениями на 10 GHz дали результат по погрешности лучше, чем цифры на калькуляторе выше. Для экспериментов был сделан МШУ с хорошим по возможности согласованием по входу WR90, пусть и с потерей коэффициента шума (рис. 2, его данные и приведены в разделе DUT на рис. 1). Простое устройство для измерений (рис. 3): рупор с достаточно широкой диаграммой, около 90°, направленный в небо под углом 45° из окна дома, тестовый МШУ, конвертер 10 GHz с увеличенной частотой ПЧ для лучшего подавления зеркального канала, подключенный к измерительному приемнику. Полоса приемника около 120 kHz, кажется узковатой для измерений шума, и показания вольтметра на его выходе подергивались в разные стороны вокруг некоторого среднего значения³.

Рис. 2



В качестве «горячей» температуры использовал листы итальянского пенного СВЧ поглотителя, располагаемые в секторе главного лепестка рупора так, чтобы перекрыть по возможности весь сектор, не приближаясь к самому рупору ближе 1-2 λ . Ожидал, что его шумовая

температура близка к температуре физической, естественно, с какой-то погрешностью, связанной с неидеальностью поглотителя и тем, что прямо у окна, там, где располагается устройство, может быть немного теплее по сравнению с температурой у наружной стенки, где удобно расположить термометр, или температурой воздуха из данных метеослужб. На фото рис. 3 видно, что измерения были зимой, поэтому поглотитель оставлял за окном на некоторое время: пористая структура может замедлять его остывание до окружающей температуры.

«Холодная» температура это шум неба. В него дает вклад реликтовый и галактический шум, для измерений можно взять величину 4 K с разбросом 1 K. Кроме того, сюда дает вклад шум атмосферы за счет поглощения на парах воды в ней. На диапазоне 10 GHz он невелик, хотя и больше, чем на 1296 MHz, по величине приблизительного того же порядка: у меня эта величина была ~ 6 K, всего шум неба с учетом атмосферы ~ 10 K. Это при ясной погоде, и стоит помнить, что при плотной облачности, дожде или снеге ослабление в атмосфере и ее шум и, следовательно, вносимый ей вклад в шум неба определить трудно, обычно неизвестны ни плотность облаков, ни интенсивность осадков,



Рис. 3

² См. <http://www.vhfdx.ru/apparatura/malenkaya-eme-stantsiya-s-horoshimi-vozmozhnostyami-1296-mgts-chast-3>.

³ Разброс показаний вольтметра измерительного приемника учтен при вычислении Y-фактора, см. далее.

на 10 GHz их влияние есть. Ослабление в атмосфере и ее шумовую добавку к температуре неба можно посчитать с помощью калькулятора Atmosphere VK3UM⁴.

Широкая диаграмма рупора, принимающая шум с многих направлений, что-то обязательно зацепит как с горизонта, так и со стены дома. Что-то рупор примет из земли и окружения своими задним и боковыми лепестками, даже если расположить его вертикально вверх, когда весь главный лепесток смотрит в небо. Кроме того, стоит учесть, что атмосферный вклад в «холодную» температуру неба зависит от угла наклона: при разных углах наклона будет разная величина ослабления, а направленный в небо рупор видит разные по толщине слои шумящей атмосферы.

Зная диаграмму рупора все это можно учесть, и такая работа была проделана. По возможности точно посчитал диаграмму на HFSS10 насколько позволяют вычислительные возможности уплотнить сетку расчета, см. прил. 1. Сделано суммирование по слоям (по углу наклона с шагом 9°) шума неба в секторе 0-90° (табл. 1) с учетом усиления диаграммы, данные по ослаблению в атмосфере и вносимому ею вкладу в шум неба взяты по калькулятору VK3UM. Результат суммирования по диаграмме рупора дает шум неба 9.9 K.

Таблица 1. Шум неба, $T_{horn\ in}$ при разных углах наклона

(WX: 4 °C, влажность 59%, 1018.3 гПа, ясно).

elev. deg	atten, dB	T_{atten} , K	T_{space} , K	$T_{horn\ in}(T_{sky})$, K	T_{atm} , K
5	0.607	36.51	4	39.99	280
14	0.219	13.74	4	17.54	279
23	0.135	8.59	4	12.47	281
32	0.100	6.36	4	10.27	279
41	0.081	5.15	4	9.08	279
50	0.069	4.42	4	8.36	280
59	0.062	3.95	4	7.89	279
68	0.057	3.65	4	7.60	280
77	0.054	3.48	4	7.43	282
86	0.053	3.40	4	7.35	280

T_{atten} – шумовая температура, вносимая атмосферой;
 T_{space} – температура космоса;
 $T_{horn\ in} = T_{sky}$ – температура неба (в раскрыве рупора);
 T_{atm} – физическая температура атмосферы (вычислена и выведена для контроля при каждом угле наклона).

Результат суммирования по диаграмме рупора – 9.9 K.

Далее следовало учесть то, что рупор собирает с горизонта и стен, рис. 4а, опять же с учетом усиления диаграммы с разных направлений, боковых и заднего лепестков. Тут (в отличие от случая, когда рупор смотрит вертикально вверх, рис. 4б) результат будет зависеть от ориентации рупора, что связано с разной шириной его диаграммы в Е- и Н-плоскостях.

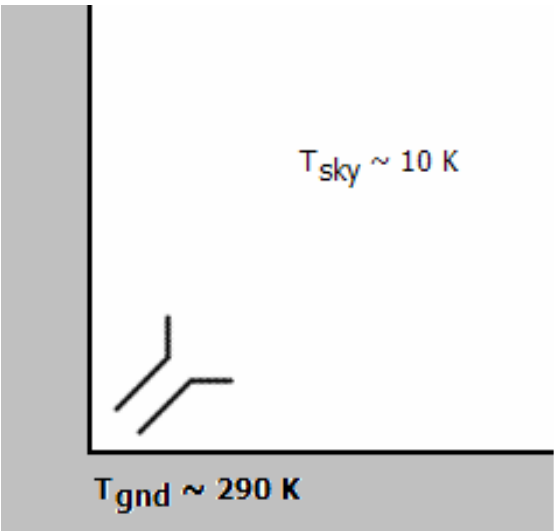


Рис. 4а. Рупор направлен в небо под углом 45°. Уровень шума на выходе рупора зависит от поляризации.

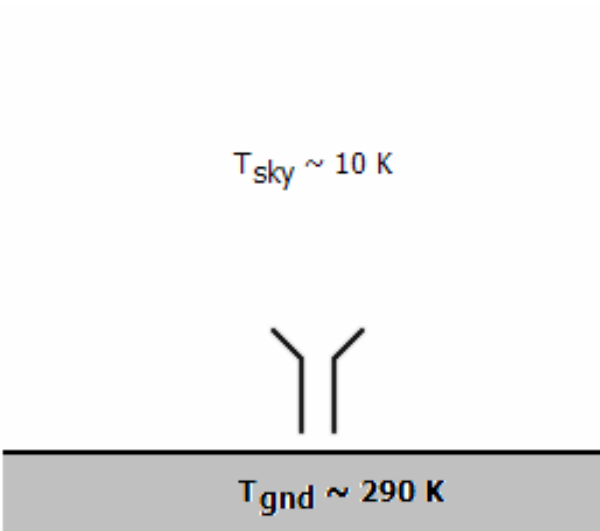


Рис. 4б. Рупор смотрит в зенит, ориентация рупора значения не имеет.

При поляризации, направленной вдоль линии угла стенки и земли (горизонтальной поляризации), собираемый с них шум получается меньше, для другой поляризации (вертикальной) – больше. Для

⁴ См. <http://www.vk3um.com/atmosphere%20calculator.html>.

погоды, при которой делались измерения (см. заголовок табл. 1), и горизонтальной поляризации цифры по собранному рупором шуму будут такими (табл. 2):

Таблица 2. Шум «холодного» рупора.

T_{amb}, K	T_{sky}, K	T_{gnd}, K	T_{cold}, K	$\delta T_{sum}, K$	$\delta T_{total}, K$
277	9.9	14.5	24.0	~ 0.5	~1.2

T_{amb} – окружающая температура;

T_{sky} – температура неба (в раскрые рупора);

T_{gnd} – добавка к температура неба с земли и стен;

T_{cold} – «холодная» температура рупора;

δT_{sum} – ошибка суммирования по диаграмме;

δT_{total} – ошибка с учетом неопределенности температуры космоса ~ 1 K.

При расчетах полагалось, что шумовая температура земли равна ее физической температуре. В реальности она меньше, и сказать точно насколько не так просто, здесь придется согласиться с некоторым элементом произвола. Мы имеем шум «холодного» рупора 24 K, если землю мы считаем хорошим поглотителем (т.н. абсолютно черным телом) и ее шумовая температура равна той, которую показывает обычный термометр. Для реального горизонта и стен дома цифра 24 K будет верхним пределом того, что может оказаться на «холодном» рупоре. Если мы возьмем цифру 22 K с погрешностью 2 K, то это будет соответствовать шумовой температуре окружения ~ 240 K с разбросом ~ 40 K, относя тем самым его реальную способность шуметь в диапазон разброса ~ 80 K. Диапазон довольно широкий. Кроме того, снижая расчетную температуру земли и увеличивая разброс, можно только ухудшить результат измерений, как по коэффициенту шума устройства, так и по его погрешности. Итак, далее мы отталкиваемся от этой цифры – температуры «холодного» рупора $T_{cold} = 22 K$ с общей ошибкой ~ 2.5 K⁵.

Далее воспользуемся калькулятором, специально написанным для экспериментов с «холодным» рупором⁶. Он реализует формулу вычисления шумовой температуры приемника,

$T_{RX} = T_{hot} \frac{1}{Y-1} - T_{cold} \frac{Y}{Y-1}$, по температуре вычисляет коэффициент шума, а также позволяет оценить

их погрешности. Вводим ранее полученные цифры в поля калькулятора, значения Y-фактора 3.227 и его погрешности 0.075, определенные по показаниям вольтметра на выходе измерительного приемника для «холодной» и «горячей» температур. Размер возможной ошибки в «горячей» температуре $T_{hot} = 277 K$ оцениваем в 10 K, также думая о некотором запасе: возможный меньший шум стен и горизонта скажется и на «горячей» температуре рупора, несколько K тут можно потерять запросто, однако делать корректировку T_{hot} вниз не будем, снова отказываясь от стремления делать выбор к улучшению результата в ситуации неопределенности.

Нам нужно еще учесть потери в самом рупоре: они немного ослабят сигнал – шум неба, а также добавят немного своего шума к T_{cold} . В упомянутом калькуляторе опция для вычисления такой добавки есть⁷. По справочнику для волновода из луженой жести с размерами WR90 имеем 0.02 dB для длины равной длине всего рупора, включая раскрыв и волноводную часть⁸. Это цифру и примем за величину потерь в рупоре. Добавка составит 1.17 K, в итоге «холодная» температура у самого МШУ будет 23.17 K.

И последнее что нужно учесть это рассогласование входа МШУ и рупора⁹, рассогласование повлияет на величину ошибки в T_{cold} и T_{hot} . КСВ того и другого 1.3, для итогового результата по ошибкам получим 2.62 и 13.67 K, суммирование ошибок выбираем статистическое (RMS).

И теперь можем смотреть результат – $NF = 1.18 dB$ ($T_{rx} = 90.8 K$) с погрешностью 0.095 dB, см. рис. 5. Это уже лучше, чем возможная ошибка с измерителем «на столе» (рис. 1).

⁵ Суммирование ошибок делается статистически (RSS) или как среднеквадратических (RMS) величин,

$$\delta T_{stat} = \sqrt{\delta T_1^2 + \delta T_2^2 + \dots + \delta T_n^2}.$$

⁶ Скачать его можно по ссылке <http://www.vhfdx.ru/faylyi/view-details/radiolyubitelskie-rascheti/coldhorn>.

⁷ Вызывается по кнопке «Attenuation & losses».

⁸ Для сравнения медный волновод той же длины будет иметь потери 0.01 dB.

⁹ Кнопка «Mismatch» на калькуляторе.

Мы также помним, что это результат для полного коэффициента шума системы, чтобы вычислить его для «голого» DUT – МШУ надо сделать т.н. deembedding по формуле Фриза¹⁰. При этом надо будет еще учесть неопределенность в коэффициенте шума по входу конвертера 10 GHz к измерительному приемнику, а также возможные ошибки в величине усиления DUT – МШУ. Учет этих ошибок дает в моем случае добавку к общей погрешности порядка 0.01 dB при статистическом суммировании, и в целом результат все равно получается неплохой.

Рис. 5. Вычисления шумовой температуры и коэффициента шума.

Видны и пути улучшения точности. Во-первых, надо попытаться избавиться или уменьшить возможную ошибку, связанную с неопределенностью шумовой температуры горизонта и стен, добавка от них все-таки существенна. Это можно сделать, используя менее шумящие рупора (с лучшим подавлением боковых и заднего лепестков), а также с более узким основным лепестком. Во-вторых, попробовать улучшить источник «горячей» температуры и снизить возможную ошибку в T_{hot} .

Для сравнения шумовых характеристик разных рупоров примем определенные общие условия для всех них: рупор без потерь, температура неба – $T_{sky} = 0$ K, шумовая температура окружения (земли, горизонта и стенки) $T_{gnd} = 290$ K, рупор при наличии стенки направляется в небо под углом 45° , его ориентации (поляризации) берутся вдоль угла между стенкой и горизонтом и перпендикулярно. И будем сравнивать температуры T_{cold} на выходе рупора. Расчетные шумовые характеристики разных рупоров приведены в приложениях, они собраны в табл. 3, все рупора посчитаны на 10.368 GHz.

Таблица 3. Шумовые характеристики рупоров.

Рупор	T_{cold} , K, Hor	T_{cold} , K, Vert	T_{cold} , K, в зенит	описание
Пирамидальный	15.27	21.13	6.98	прил. 1
Пирамидальный длинный, by W1GHZ	7.77	19.48	6.27	прил. 2
Скобелева короткий, by W1GHZ	2.57	4.6	0.57	прил. 3
Скобелева, by RA3AQ & RW3BP	2.03	4.32	1.22	прил. 4

Первым кандидатом рассматриваем удлиненный пирамидальный рупор. Его размеры были взяты по программе W1GHZ Hdl_Ant¹¹, она позволяет подобрать рупор под облучение параболического зеркала, и, поскольку нужен был рупор с обуженным главным лепестком, в программе при подборе рупора был выбран параметр $f/d=1$. После по этим размерам характеристики рупора получались с помощью HFSS10. По шумам с рупором в зенит над плоской землей он почти такой же, как простой пирамидальный. Сравнительно широкие бока диаграммы также уравнивают его с простым при одной

¹⁰ См. http://www.rohde-schwarz.cz/file/1MA178_1E_the_Y_factor_technique.pdf, каскадные формулы на стр. 8.

¹¹ Об этой программе есть в тексте <http://www.w1ghz.org/antbook/chap6-4a.pdf>, ссылки для ее скачивания можно найти на <http://www.w1ghz.org/antbook/contents.htm>.

из поляризаций в случае со стенкой. Но при другой ориентации рупора его шум оказывается почти в два раза ниже.

Но это не лучшее, что может быть. Есть класс двухмодовых маломультирующих рупоров, из которых выберем для рассмотрения рупора Скобелева. В таблице W1GHZ¹² берем наилучший по боковым лепесткам и заднему подавлению с длиной конического раскрытия (flare) 2.48λ и большим диаметром 1.8λ . У меня не получились те цифры, что указаны в таблице для боковых и заднего лепестков, и расчет шел уже почти на пределе ресурсных возможностей той вычислительной техники, какая была в распоряжении. Но результат все равно получился хороший. Цифра 0.57 К для температуры рупора в зенит оказывается уже того же порядка, что и ошибка суммирования по диаграмме.

Длина рупора из таблицы W1GHZ получается в два раза меньше длины рупора RA3AQ&RW3BP^{13,14}, а главный лепесток немного шире. Для последнего при наличии стенки можно ожидать небольшого преимущества.

(добавлено по результатам работы с января по май 2014)

Итак, нам нужно выбрать между двумя рупорами Скобелева, коротким и длинным. По шумовым характеристикам разница между ними небольшая, но у короткого диаграмма более широкая по сравнению с длинным, усиление в максимуме около 14 dBi и 18 dBi, соответственно, разница приблизительно в 2.5 раза по мощности. При выборе исходим из желания снизить по возможности погрешность, связанную с шумовой температурой неба, «холодной температурой». По-хорошему, следовало было бы провести посуточный мониторинг шума неба, как это сделал RW3BP¹⁵ на диапазоне 1296 MHz (его результат также привожу на рис. 6). Он работал с рупором, характеристики которого приведены в Приложении 4 («длинным»), с направлением его в зенит, и наблюдал колебания шумовой температуры в пределах 1.5-2 К.



Рис. 6. Посуточный мониторинг шума неба на 1296 MHz by Сергей Жутяев RW3BP.

На диапазоне 10 GHz трудность с посуточным мониторингом заключается в том, что в течение дня или нескольких дней погода в месте работы с рупором может меняться, изменяется температура, влажность, облачность, причем, случайным образом. Потери в атмосфере на 10 GHz выше, чем на

¹² http://www.w1ghz.org/antbook/conf/optimized_dualmode_feedhorns.pdf, см. Table 1 в конце текста.

¹³ Размеры см. <http://www.vhfdx.ru/fayly/view-details/shemy-i-opisaniya/holodnyy-rupor-dlya-izmereniya-koeffitsienta-shuma>.

¹⁴ См. <http://www.vhfdx.ru/apparatura/malenkaya-eme-stantsiya-s-horoshimi-vozmozhnostyami-1296-mgts-chast-3> и прил. 4.

¹⁵ См. <http://www.vhfdx.ru/apparatura/malenkaya-eme-stantsiya-s-horoshimi-vozmozhnostyami-1296-mgts-chast-3>.

1296 MHz, и влияют на температуру рупора, причем масштаб влияния сравним с тем, что на графике рис. 6. Кроме того, вклад космических источников на 10 GHz ниже по сравнению с 1296 MHz. Все это подталкивает к тому, чтобы по возможности снизить их влияние на температуру рупора, т.е. выбрать рупор с меньшим усилением и более широкой диаграммой, учитывая ее в погрешности космического шума $\delta T_{space} \sim 1-1.5$ К при определении температуры «холодного рупора» для измерений в ясную погоду.



Рис. 7. Рупор Скобелева с волноводным входом WR90.

Фото рупора, который использовался у меня в измерениях, на рис. 7, его расчетные характеристики приведены в Приложении 3, таким «бокалом» или «фужером» и делал дальнейшие измерения. За его изготовление всяческие благодарности Андрею Афоничкину RD4HI, мне оставалось только рассчитать и впаять внутри, в волноводной части небольшой штырек-головку для согласования, без нее КСВ оказывается около 2.5. Его диаграмма уже, чем у ранее использованного пирамидального рупора, с земли и стен он собирает меньше шума, и такой вариант кажется оптимальным для работы в условиях, когда его приходится направлять в небо под углом 45° .

Далее, шумы холодного рупора за счет поглощения в атмосфере. Мы их считали ранее с помощью калькулятора Atmosphere VK3UM¹⁶, всецело полагаясь на заложенную в нем математику и без детальной инспекции. Сейчас мы немного залезем внутрь этого «черного ящика». Описать фактор облачности или интенсивности осадков более-менее точными и надежными цифрами сложно, во всяком случае, конкретных идей на этот счет нет. Поэтому исключаем его, делая измерения и последующую обработку их для случая ясной

погоды, а поглощение в атмосфере считаем по данным температуры, влажности и давления у земли, которые легко доступны. Судя по рекомендациям ITU¹⁷, Даг VK3UM реализовал в программе приближенную методику расчета затухания в атмосфере, дающую 10%-ную точность. В диапазоне углов наклона (точнее, возвышения над горизонтом, elevation) от 5° до 90° используется формула

$A = \frac{A_{90^\circ}}{\sin \theta}$ dB, здесь θ - угол над горизонтом, A_{90° - затухание при угле 90° в dB. Формула достаточно

простая и удобная для практических работ, а для расчета затухания при угле 90° можно использовать программу Дага VK3UM. Теперь по известному затуханию можно вычислить и шумовую температуру. По рекомендациям ITU для этого используется, фактически, формула для температуры шумового сигнала на выходе аттенюатора¹⁸, которую мы здесь перепишем в удобном виде:

$$T_{sky} = T_{eff} \left(1 - 10^{-\frac{A}{10}} \right) + T_{space} 10^{-\frac{A}{10}},$$

где T_{sky} – температура неба в раскрыве рупора (на его входе), $T_{space} \sim 4$ К – температура космоса (реликтовый и галактический шум), T_{eff} – эффективная температура атмосферы, как аттенюатора, A – затухание в атмосфере в dB. Анализ цифр по шумовой температуре атмосферы, получающихся в

¹⁶ См. <http://www.vk3um.com/atmosphere%20calculator.html>.

¹⁷ См. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en> в редакции от сентября 2013, действующей на момент написания, Annex 2.

¹⁸ См. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.372/en> в редакции от сентября 2013, формула (10).

расчетах с калькулятором VK3UM, указывает, что Даг использовал в программе значение $T_{eff} \approx 280$ К. ИТУ для этой формулы дает цифру $T_{eff} = 275$ К, как «обычно используемую», при этом точность расчета по формуле составляет 0.1 dB ($\sim 2.5\%$), что кажется очень и очень хорошей точностью. Значение $T_{eff} = 275$ К мы примем для дальнейших расчетов, но все-таки позволим себе усомниться в 2.5%, поводом к чему служит комментарий к значению $T_{eff} = 275$ К, как «обычно используемому», и примем возможную ошибку при расчете шума по формуле аттенюатора $\sim 10\%$. Но вообще, для меня не совсем ясно, из каких соображений выбираются такие значения T_{eff} : известно, что физическая температура атмосферы меняется с высотой, сама зависимость определяется множеством факторов, а в литературе можно встретить и цифры $T_{eff} = 150$ К при использовании формулы аттенюатора для атмосферы. В данном вопросе мы полагаемся, фактически, на авторитет ИТУ¹⁹, других вариантов у меня на сегодня нет, к сожалению.

При углах меньше 5° ИТУ рекомендует использовать для расчета затухания в атмосфере более точную методику, но она довольно громоздка, при этих углах и программа VK3UM не делает вычислений. Тут нас выручает то, что вклад в шумовую температуру рупора с этих углов ослаблен по сравнению с максимумом вдоль оси рупора, благодаря его направленности. Оценка вклада с участка малых углов до 10° , дает цифру порядка 0.6 К для короткого рупора Скобелева при установке его под углом 45° к горизонту, таким образом, учет неопределенности шума атмосферы при малых углах мы будем делать, добавляя 0.2-0.3 К в погрешность расчета атмосферного вклада в целом.

Об учете шума, который «холодный рупор» собирает с земли и стен, мы уже говорили. С рупором Скобелева ничего принципиально нового нет, отличие лишь в цифрах, он обладает лучшими шумовыми характеристиками, и земля со стенами на него влияют существенно меньше. Ошибку, связанную с неопределенностью шумовой температуры земли и стен, мы учтем далее.

Теперь подведем итоги по температуре «холодного рупора», собирая вместе все погрешности на конкретном примере, рупор направлен под углом 45° в небо, поляризация «горизонтальная».

Таблица 4. Итоги по шуму «холодного» рупора Скобелева.

Погода:	20° С (293 К), влажность 29%, давление 1023 гПа, ясно
Космический шум, галактические источники, небесные объекты:	$T_{space} \pm \delta T_{space} = 4 \pm 1.5$ К
Затухание в атмосфере (зенитное):	0.048 dB
Шум неба (атмосфера + космический шум):	$T_{sky} = 9.21$ К (результат суммирования по диаграмме рупора)
- ошибка расчета затухания:	$\delta T_{atm1} = 0.6$ К
- ошибка расчета температуры:	$\delta T_{atm2} = 0.6$ К
- дополнительная ошибка вклада при малых углах элевации:	$\delta T_{atm3} = 0.3$ К
Шум рупора с учетом окружения:	$T_{horn} = 11.71$ К (результат суммирования по диаграмме рупора)
- ошибка по шуму земли и стен:	$\delta T_{gnd} = 0.8$ К ($\sim 1/3$ прибавки к шуму неба от окружения рупора)
- численная ошибка суммирования по диаграмме:	$\delta T_{sum} = 0.5$ К
Итого по погрешностям:	$\sum_{RSS} \delta T \approx 2$ К (суммирование статистическое)
Результат по шуму «холодного рупора»:	$T_{horn} \pm \delta T_{horn} = 11.71 \pm 2$ К

Кажется, мы почти ничего не выиграли в цифре погрешности по сравнению с пирамидальным рупором, а относительная погрешность даже стала больше со снижением общей температуры T_{horn} из-за использования малоразмерного рупора Скобелева. Но, во всяком случае, оснований для используемых цифр по шуму «холодного рупора» стало больше, и мы движемся дальше.

¹⁹ Не исключая при этом, что и авторитеты могут ошибаться, ☺.

О «горячих» источниках. Неплохим вариантом было бы использование волноводных нагрузок-терминаторов, см. рис. 8. Правый на фото мне любезно предоставил RW3BP, за что ему отдельные благодарности. Есть несколько моментов, которые стоит оговорить в связи с ними. Цифра по «горячей» шумовой температуре известна более-менее хорошо: она совпадает с физической, а погрешность ее сводится в основном к ошибке термометра. Это что-то в районе 1-2 К. Если измерения производятся снаружи помещения, например, в ясную морозную погоду, то следует убедиться, что времени после перемещения нагрузок из комнатного тепла наружу прошло достаточно, чтобы они успели остыть. Ошибку за счет неидеального КСВ нагрузок можно учесть позже, такая опция есть в ранее использованном калькуляторе для «холодного рупора»²⁰. Его желательно знать, и, в любом случае, чем он лучше, тем ниже будет ошибка, как по «горячей» температуре, так и по коэффициенту шума в итоге. Тем более, при высоком КСВ по входу устройства, коэффициент шума которого мы измеряем.



Рис. 8. Волноводные нагрузки WR90.

В процессе измерений удобно было бы использовать для переключения между «холодной» и «горячей» температурой, т.е. между рупором и нагрузкой волноводный коммутатор. Коммутаторы WR90 встречаются на eBay, и сравнительно недорого. Если точно известны потери в коммутаторе, то хорошо: их следовало бы учесть при вычислении уровней шума, которые оказываются на входе МШУ при измерениях. Повлияют эти потери на «холодную» температуру в сторону увеличения. Второй вопрос – КСВ коммутатора на рабочей частоте. Но, по-любому, дополнительных забот с учетом коммутатора в тракте хотелось бы избежать, ради чего придется согласиться с неудобством переставлять рупор и нагрузку вручную.

В процессе измерений удобно было бы использовать для переключения между «холодной» и «горячей» температурой, т.е. между рупором и нагрузкой волноводный коммутатор. Коммутаторы WR90 встречаются на eBay, и сравнительно недорого. Если точно известны потери в коммутаторе, то хорошо: их следовало бы учесть при вычислении уровней шума, которые оказываются на входе МШУ при измерениях. Повлияют эти потери на «холодную» температуру в сторону увеличения. Второй вопрос – КСВ коммутатора на рабочей частоте. Но, по-любому, дополнительных забот с учетом коммутатора в тракте хотелось бы избежать, ради чего придется согласиться с неудобством переставлять рупор и нагрузку вручную.

Здесь, однако, может возникнуть один нюанс. Перестановка рупора и коммутатора занимает время порядка нескольких минут, как минимум. При хорошем разрешении измерительного приемника может стать заметным дрейф усиления измерителя шума (т.е. конвертера, самого измерительного приемника). Мне пришлось столкнуться с такой проблемой в морозную погоду: ждать выравнивания температурного режима приходилось долго, и нужно было придумать способы учесть дрейф усиления и скорректировать результат. Об этом немного ниже.

Улучшение точности измерения коэффициента шума дает также снижение инструментальной погрешности Y-фактора. Если для измерения шумовых сигналов используется измерительный приемник с вольтметром на выходе, то добиться улучшения точности можно увеличением времени усреднения сигнала на выходе приемника. Широкая полоса приемника, ~ 1-2 МГц желательна,

возможно, и больше, в разумных пределах, конечно. Точность измерения (относительная) $\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\tau \Delta f}}$,

соответственно, чем больше полоса Δf и время измерения τ , тем выше точность. В моем случае полоса была 120 kHz, показания вольтметра, подключенного прямо к выходу приемника, прыгали. Можно просто зафиксировать максимум и минимум показаний, взять среднее между ними, а абсолютную разницу между средним и, скажем, максимальным принять за погрешность. Но можно и ввести дополнительное усреднение, причем, довольно простыми способами, чтобы избавиться от прыжков показаний вольтметра и соответствующей погрешности. Я использовал обычную

²⁰ <http://www.vhfdx.ru/fayly/view-details/radiolyubitelskie-raschetyi/coldhorn>.

интегрирующую RC-цепочку, см. рис. 9. Емкость конденсатора хорошо подобрать так, чтобы и время стабилизации показаний было приемлемым: она зависит и от полосы, и от выходного сопротивления

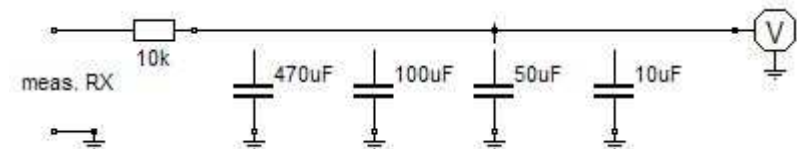


Рис. 9. Усредняющая RC-цепочка.

детекторного выхода приемника. Для цифрового тестера при напряжениях на выходе приемника порядка 1 V можно добиться устойчивых показаний при разрешении разрядов шкалы 1 mV (точность ~0.05%), но какое-то время приходится выждать. При отсутствии или незначительном дрейфе усиления можно

считать время усреднения минутами: при измерениях, когда важна их точность, лучше не спешить.

Второй фактор точности измерения – ошибки линейности тракта приемника, здесь мне особо сказать нечего, кроме того, что стоит следить, чтобы измеряемые уровни не выходили за паспортные, где линейность гарантирована, либо протестировать отдельно линейные участки приемника. Хороший вариант – это специализированные устройства для измерения шума, использующиеся в радиоастрономии²¹, либо самодельные измерители с современными RMS-детекторами, дающими хорошую точность, и известными ошибками линейности, но это вопрос на перспективу.

О дрейфе усиления. Обнаружился и стал доставлять неудобства при измерениях в морозную погоду, после дополнительного усреднения стал особенно заметен, и надо было решать, что с ним делать. Можно было, конечно, посчитать его систематической погрешностью, увеличить цифры соответствующих ошибок, но лучше потратить немного времени, придумать путь учесть его в результатах, и тем самым уменьшить по возможности связанную с дрейфом ошибку измерения. Зря мы, что ли, старались с усреднением?

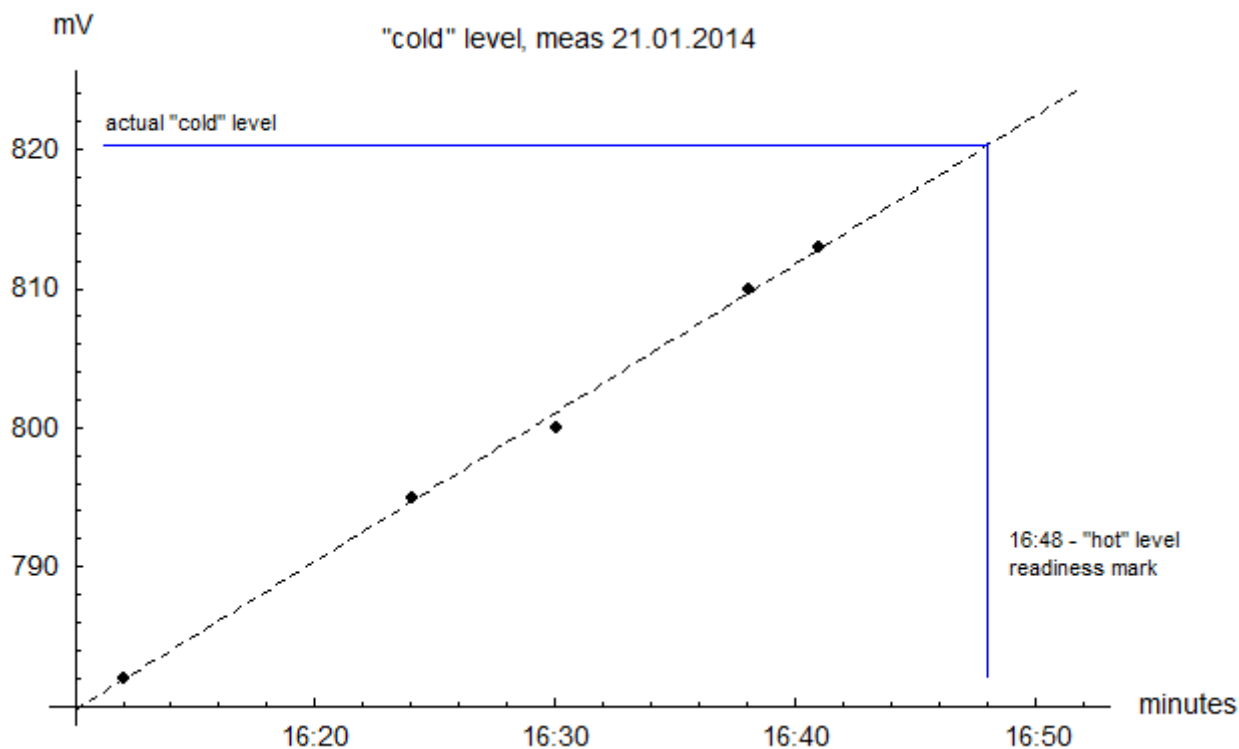


Рис. 10. График экстраполяции отсчетов при дрейфе усиления.

Для коррекции результатов по дрейфу использовал прием, связанный с экстраполяцией временной зависимости отсчетов уровня по вольтметру на выходе RC-цепочки. Чтобы вычислить Y-фактор, т.е. отношение уровней на выходе системы измерения шума, нужны два значения, при источнике с «холодной» температурой на входе устройства и «горячей». Если отсчеты фиксируются одновременно, или с небольшим промежутком времени, таким, что дрейф усиления не скажется, проблемы нет: нам важны не абсолютные уровни шума, а Y-фактор, их отношение. Если же есть

²¹ См. <http://www.cupidotech.com/prod.html>, IF module/Total Power radiometer, http://www.cupidotech.com/radII/LC_tech_RadII_brochure.pdf by Luis Cupido CT1DMK.

заметный дрейф, то их нужно привести к одному моменту времени, т.е. скорректировать один из отсчетов, как минимум.

Поступал таким образом. Фиксировал уровень шума по вольтметру, скажем, соответствующий «холодному» источнику, через промежуток времени после манипуляций с рупором такой, чтобы процесс усреднения завершился²². Далее снимал показания вольтметра, скажем, через каждые несколько минут, и отображал их на графике, на рис. 10 они обозначены точками. Накопив некоторое количество отсчетов, до десятка, снимал рупор, ставил «горячую» нагрузку, ждал завершения усреднения на выходе RC-цепи, снимал показания по «горячему» уровню, и засекал, сколько времени прошло до его готовности. По графику продолжал зависимость «холодного» уровня дальше по времени, снимал с графика «холодное» значение, которое бы оказалось на момент готовности «горячего» из-за дрейфа, ну, а после уже считал их отношение или Y-фактор. Ошибку для значения «холодного» уровня, получившегося после экстраполяции, можно взять, как среднее или максимальное из разбросов имеющихся точек от линии дрейфа, для графика рис. 10 мы имеем результат $820 \pm 2 \text{ mV}$. То же самое можно проделать и наоборот, т.е. начать с «горячего» источника, и экстраполировать соответствующий ему уровень до момента снятия «холодного» значения после установки рупора. Само построение графика желательно для уверенности, что изменение показаний вольтметра из-за дрейфа можно считать линейным в масштабах времени, необходимого для отсчетов.

При расчетах NF с помощью калькулятора ColdHorn²³ не стоит забывать учесть потери в рупоре²⁴, они влияют на «холодную» температуру, что оказывается на входе измеряемого устройства, учесть ошибки, связанные с его КСВ: они могут быть не такими уж и безобидными. А также, если измеряется коэффициент шума МШУ, как отдельного устройства, то сделать deembedding при известном его усилении, поскольку методика «холодного рупора» даст лишь результат с учетом влияния и цепей после выхода МШУ. Дополнительная ошибка за счет извлечения «чистого» NF усилителя обычно невелика, ориентир 0.01 dB прибавки к результирующей ошибке.

Последние штрихи проверить наклон рупора в 45° и точность его ориентации для горизонтальной поляризации ... результат усилий в окне калькулятора, рис. 11. Ошибка измерений до 0.06 dB (после прибавки на deembedding) неплохая, немного меньший результат по цифре NF в сравнении с первыми измерениями был ожидаем после подбора режима транзистора в МШУ. Не скажу, предел ли это, во всяком случае, какой-то опыт с измерениями еще, видимо, предстоит в будущем, а уточнения или корректировки возможны. Фото с процесса см. также на рис. 12.

T cold, K	T hot, K	Y factor
12.36	293	3.928 = 5.942 dB

T cold uncertainty, K	T hot uncertainty, K	Y factor uncertainty
2.02	7.23	0.041 for Y ratio

Trx = 83.49 K, receiver NF = 1.099 dB

RMS (stat) uncertainty = 3.9 K, 0.046 dB

Absolute (max) uncertainty = 6.52 K, 0.076 dB

Рис. 11. Результаты по тестовому МШУ после оптимизации процесса измерений.

²² Или переходные процессы, зная постоянную времени RC-цепи, этот промежуток можно оценить.

²³ <http://www.vhfdx.ru/faylyi/view-details/radiolyubitelskie-raschetyi/coldhorn>.

²⁴ Для короткого рупора Скобелева (рис. 7) потери взяты 0.01 dB

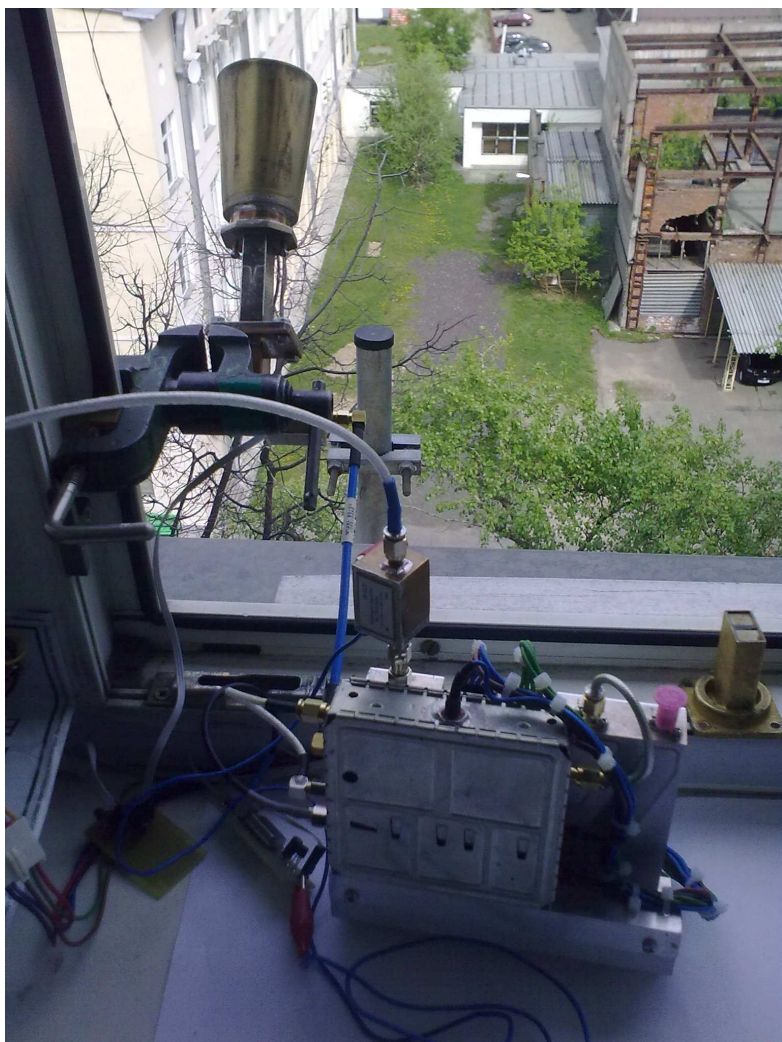


Рис. 12. Процесс измерений, рупор Скобелева смотрит в небо.

И еще один вопрос, который бы хотелось затронуть, это использование листов СВЧ-поглотителя в качестве «горячего» источника. Для измерения коэффициента шума головок, в которых МШУ совмещен с облучателем (SAT LNB или сделанные из них МШУ и конвертеры), другого способа просто не вижу. Лучшее, что мог достать, это итальянский пенный поглотитель с отражающей способностью (reflectivity) около -26 dB на частоте 10 GHz. Если соотнести эту цифру с обычным коэффициентом отражения, то получится КСВ в районе 1.1, - это просто чтобы лучше понимать с каким материалом мы имеем дело. Листы желательно размером побольше, чтобы весь главный лепесток рупора в них уместился, можно сделать из них коробочку, и, на всякий случай, избегать приближать поглотитель слишком близко к рупору: материал пусть и немного, но что-то все-таки отражает, он неидеален. Погрешность в «горячей» температуре можно взять немного больше инструментальной ошибки термометра, в районе 3-4К. Также стоит увеличить величину ошибки при измерении уровня шума от листа: колебания показаний прибора (вольтметра с RC-цепочной на выходе измерительного приемника) могут

быть заметны и коррелированы с расстоянием листа от кромки рупора, величину ошибки измерения «горячего» уровня можно взять по диапазону этих колебаний. Это в целях перестраховаться и постараться по максимуму, чтобы не наврать с итоговым результатом из-за проблем с «горячим» источником.

Благодарности:

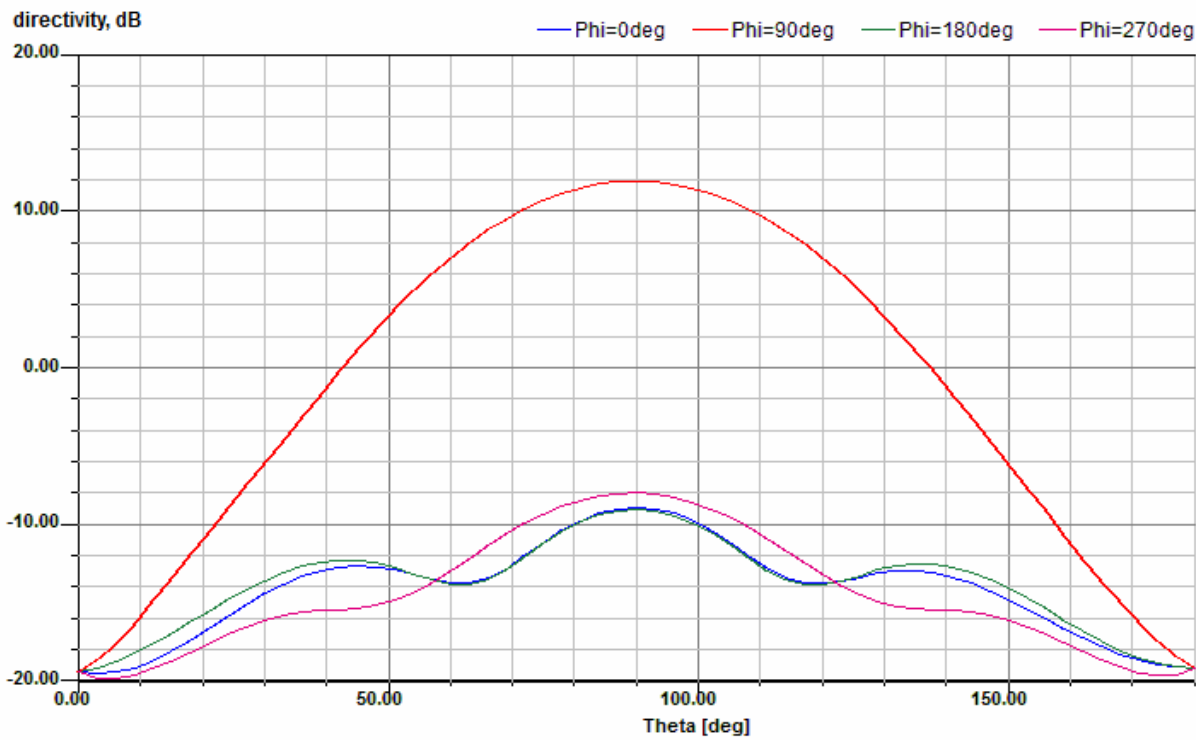
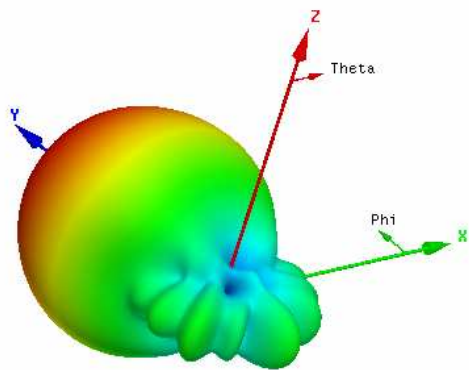
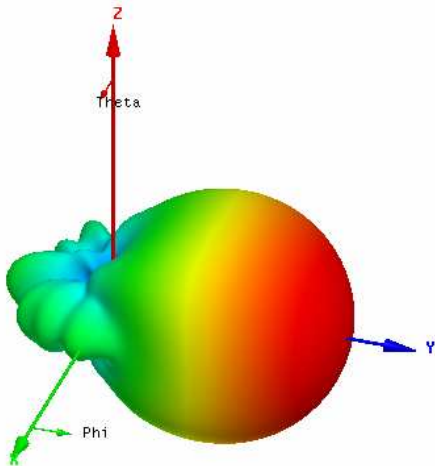
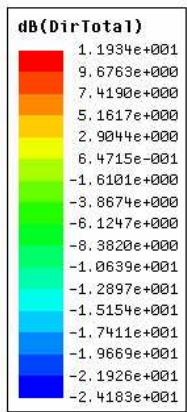
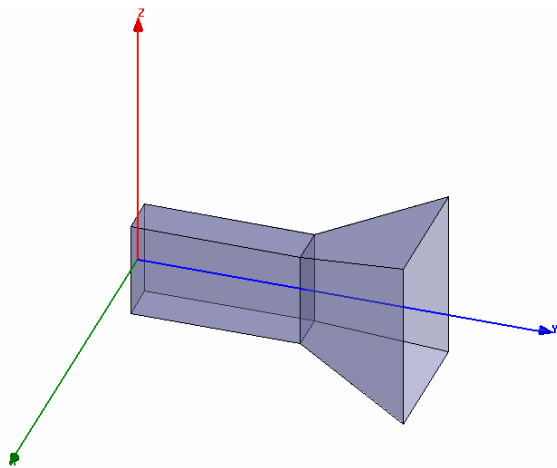
RW3BP за обсуждение предварительных результатов;
RD4HI за изготовление рупора Скобелева для измерений.

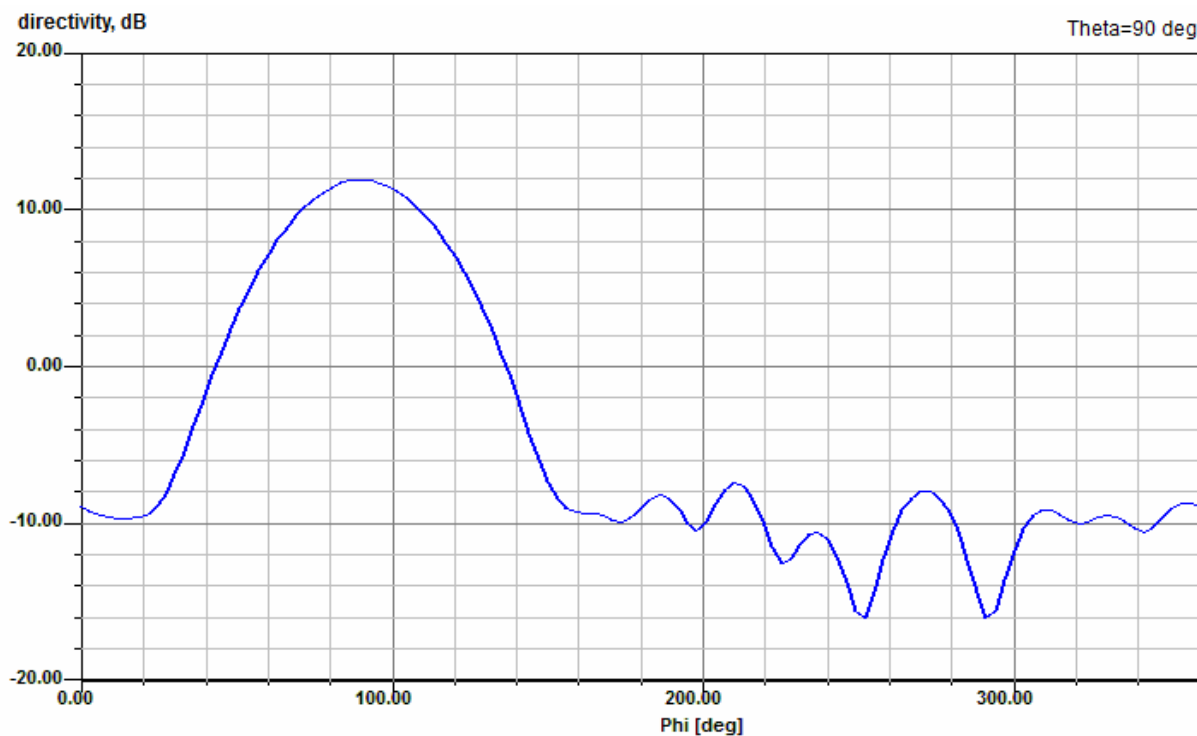
Литература (просто несколько ссылок по теме, не включенных в сноски, но относящихся к шумовым измерениям и анализу их ошибок, шумам антенн, теории измерений шума)

1. David Stockton, GM4ZNX and Ian White, GM3SEK, Noise Figure Measurement – A Reality Check, DUBUS 2013, I/74, DUBUS TECHNIK XII, p. 235.
2. Noise Figure Measurements Accuracy – The Y-factor Method, <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-3706E.pdf>, Agilent Technologies, Inc., 2013, 5952-3706E;
3. Noise Figure Measurements, http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/noise_figure_measurements.pdf, Agilent Technologies, Inc., 2009.
4. К.И. Алмазов-Долженко, Коэффициент шума и его измерение на СВЧ, Москва, Научный Мир, 2000 г, <http://www.vhfdx.ru/faylyi/view-details/shemyi-i-opisaniya/-koeffitsient-shuma-i-ego-izmerenie-na-svch>.
5. D.B. Leeson, Antenna and receiver noise, 2002, <http://hamradio.nikhef.nl/amrad/art/sysnoise.pdf>.
6. Сергей Жутяев, RW3BP, Маленькая ЕМЕ станция с хорошими возможностями - 1296 МГц (часть 2), 2010, <http://www.vhfdx.ru/apparatura/malenkaya-eme-stantsiya-s-horoshimi-vozmozhnostyami-1296-mgts-chast-2>.
7. Antenna noise, prep., Stanford University, 2001, http://www.stanford.edu/class/ee252/handouts/antenna_noise.pdf.

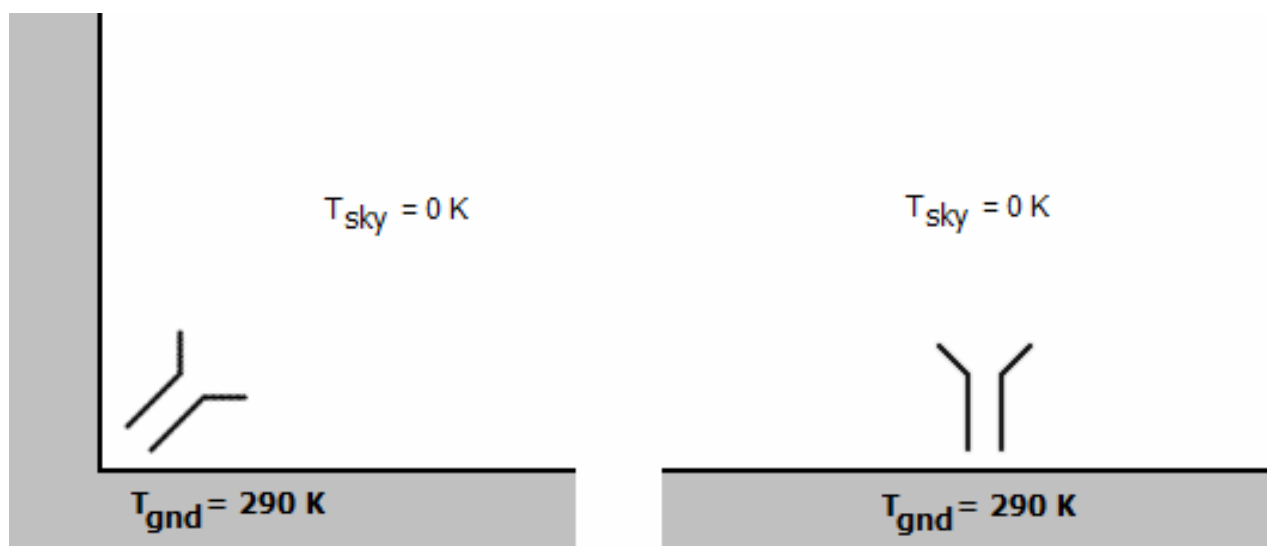
Приложение 1. Пирамидальный рупор.

Horn data:	WR90 (23x10)	
axial length	28	mm
aperture H	41	mm
aperture E	32	mm





Шумовые характеристики:



$T_{cold} = 15.27 \text{ K}$ (Hor pol)
 $T_{cold} = 21.13 \text{ K}$ (Vert pol)

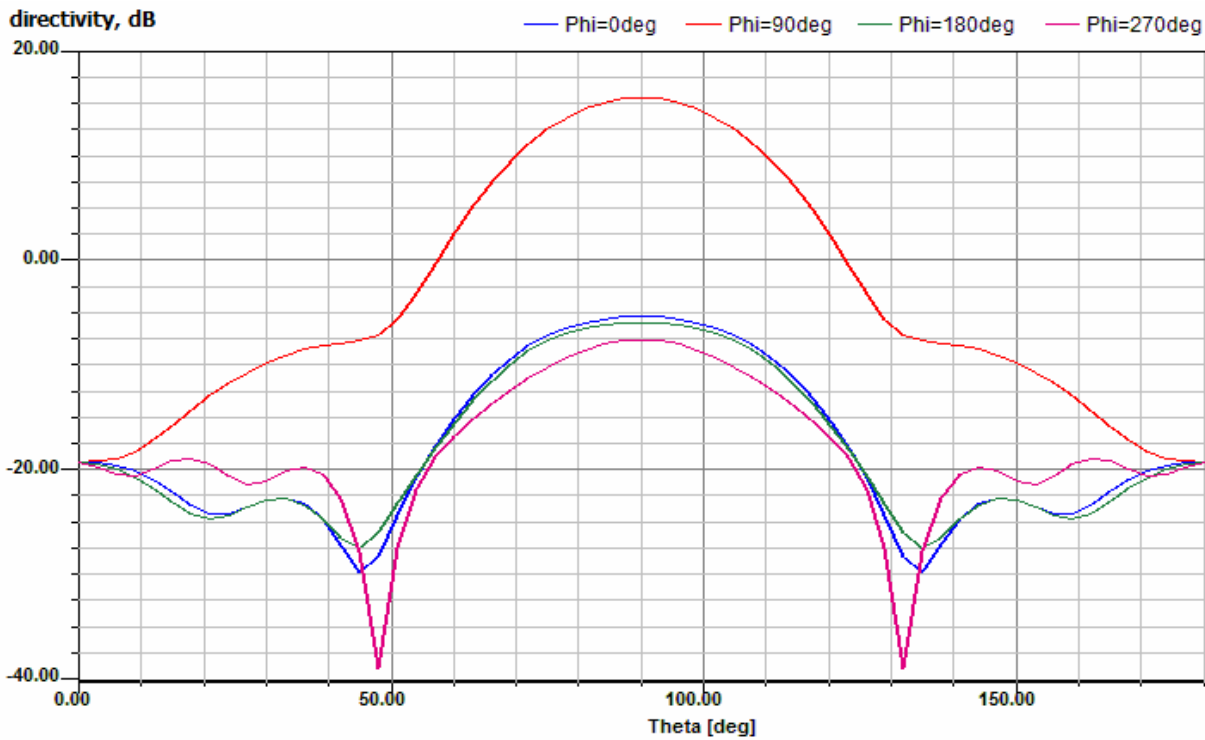
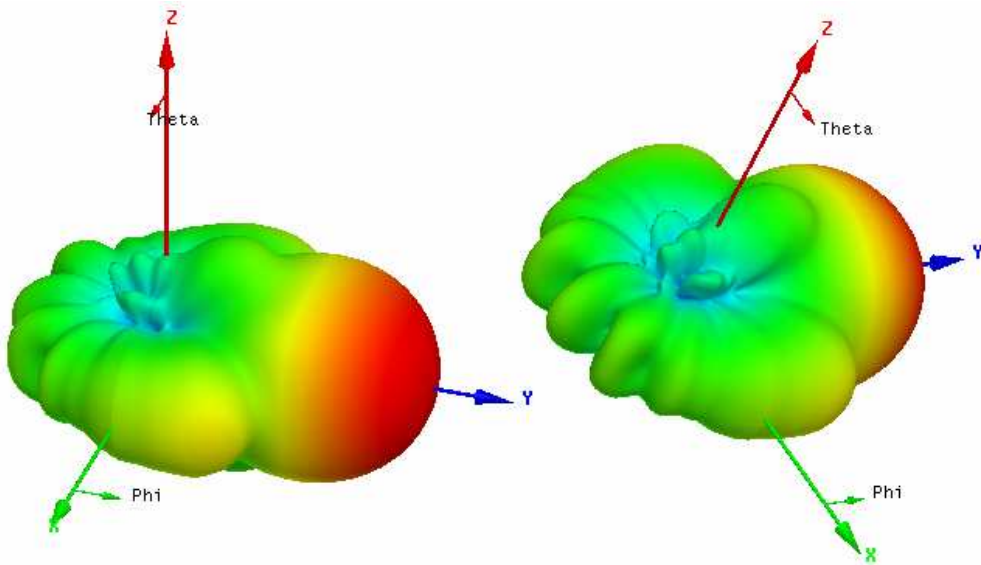
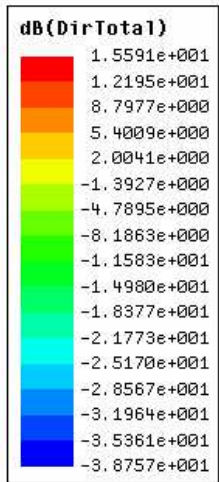
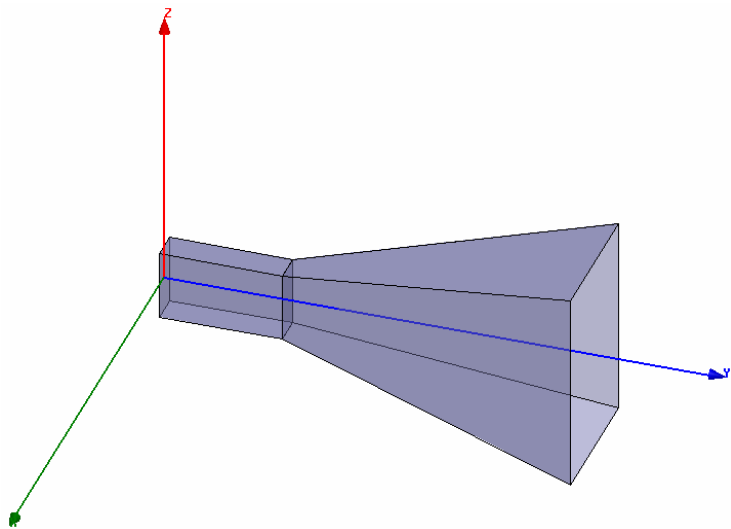
$T_{cold} = 6.98 \text{ K}$

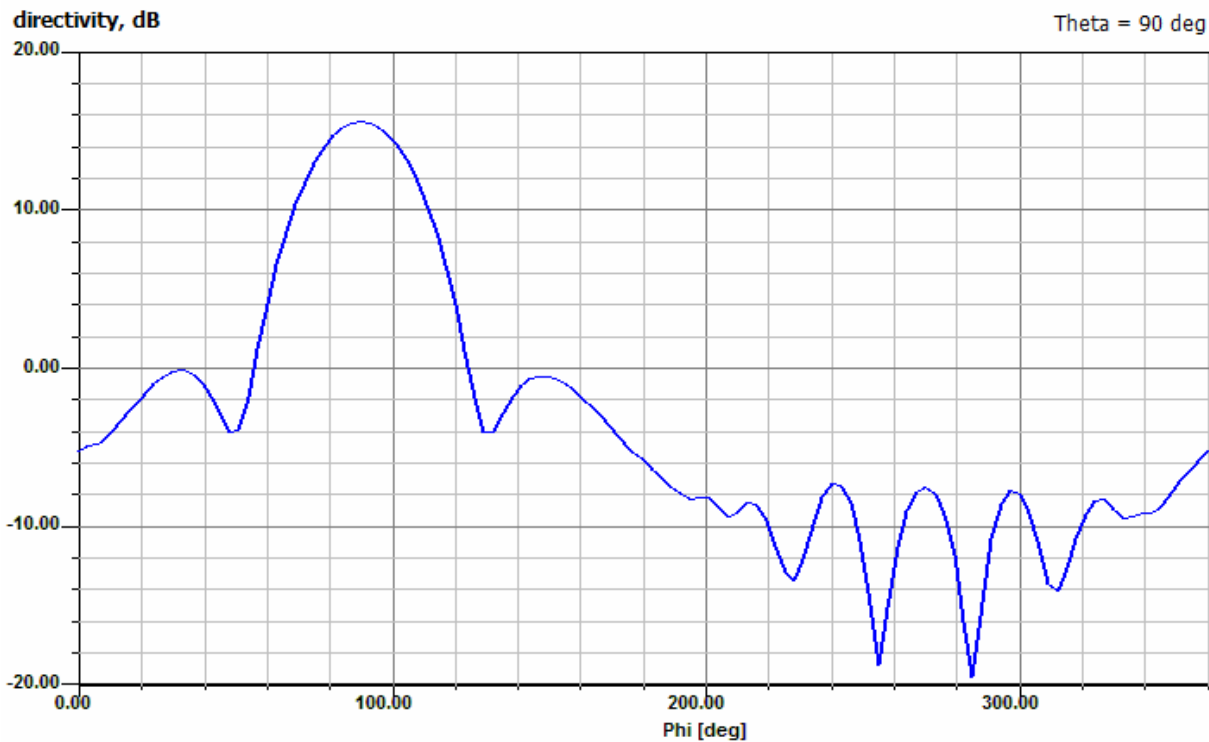
Здесь $T_{cold} = T_{horn}$ – шумовая температура «холодного» рупора без потерь при температуре неба $T_{sky} = 0 \text{ K}$ и шумовой температуре окружения $T_{gnd} = 290 \text{ K}$;
 при наличии стенки горизонтальная поляризация (Hor pol) – вдоль угла между горизонтом и вертикальной стенкой, вертикальная (Vert pol) перпендикулярна ей, угол наклона рупора к горизонту – 45° .

Приложение 2. Пирамидальный рупор (удлиненный).

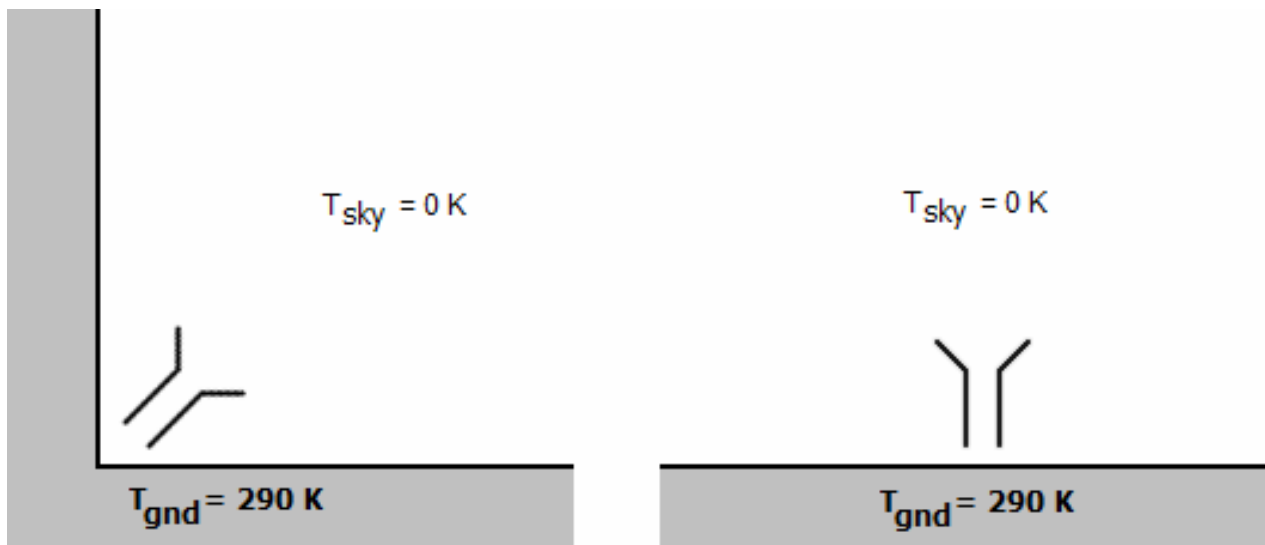
Horn data*:	WR90 (23x10)	
axial length	100	mm
aperture H	67	mm
aperture E	47	mm

*sizes by W1GHZ software Hdl_Ant for parabolic dish f/d=1.





Шумовые характеристики:



$T_{\text{cold}} = 7.77 \text{ K (Hor pol)}$
 $T_{\text{cold}} = 19.48 \text{ K (Vert pol)}$

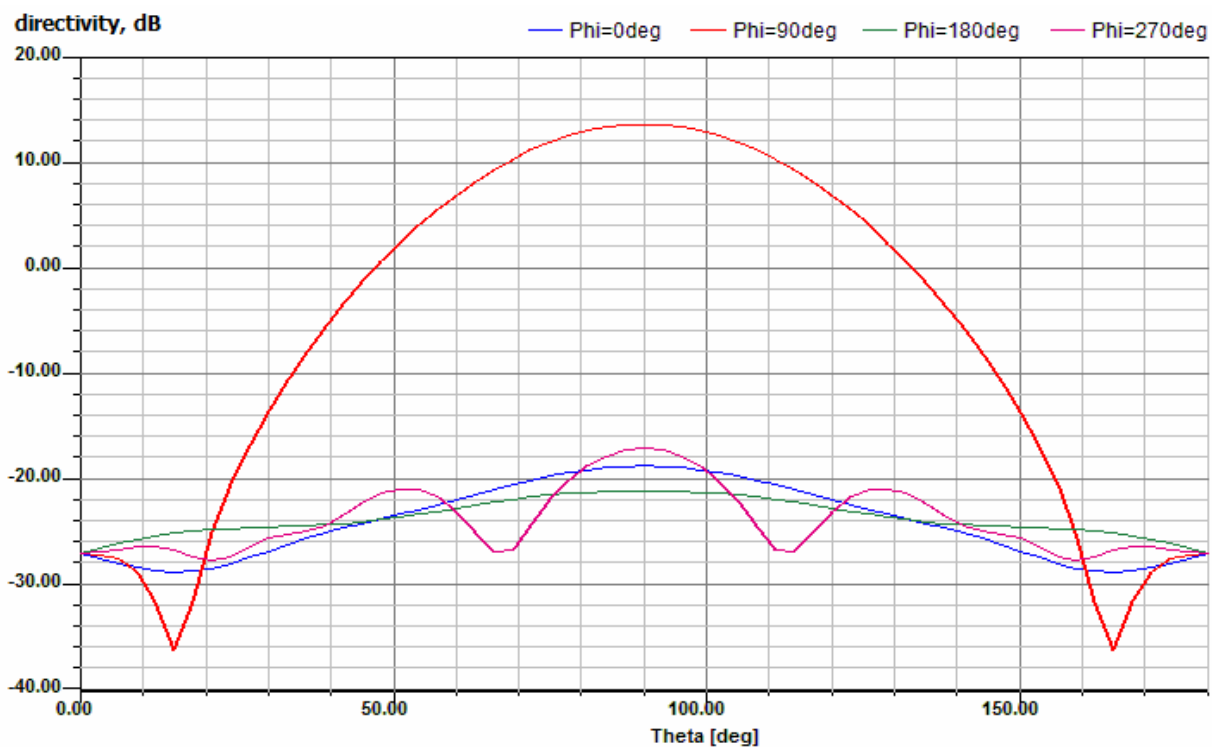
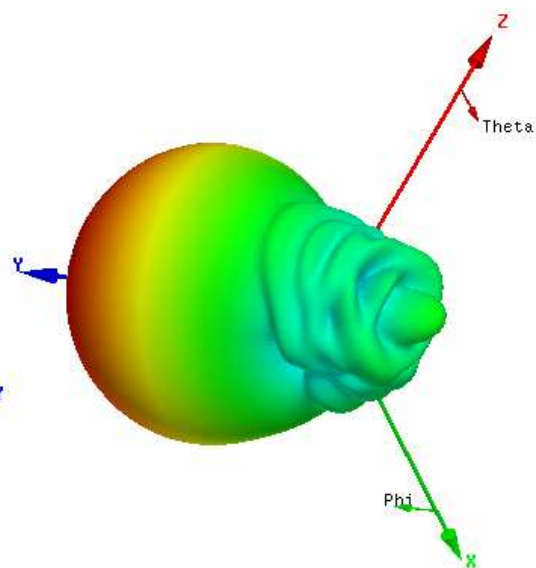
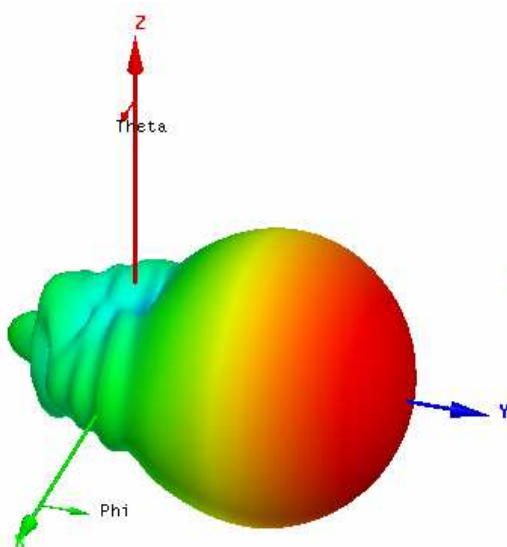
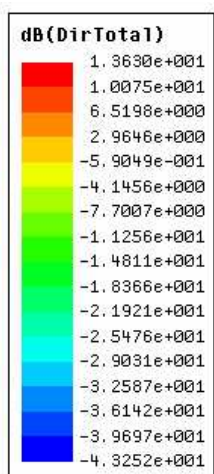
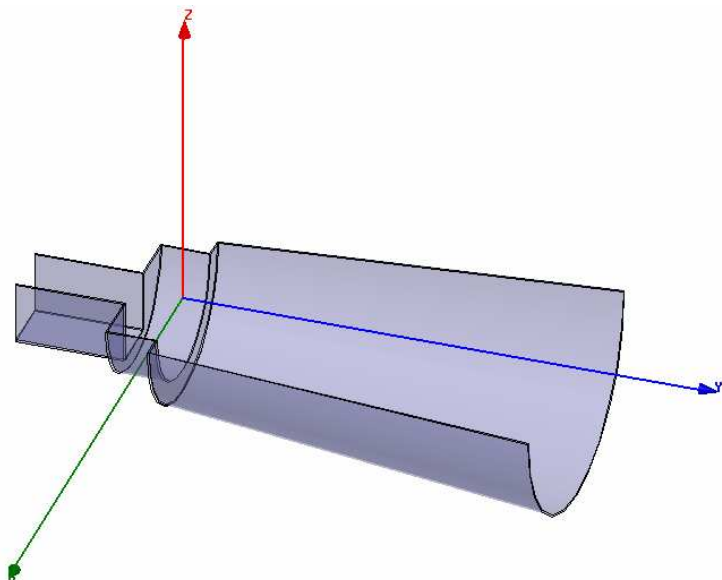
$T_{\text{cold}} = 6.27 \text{ K}$

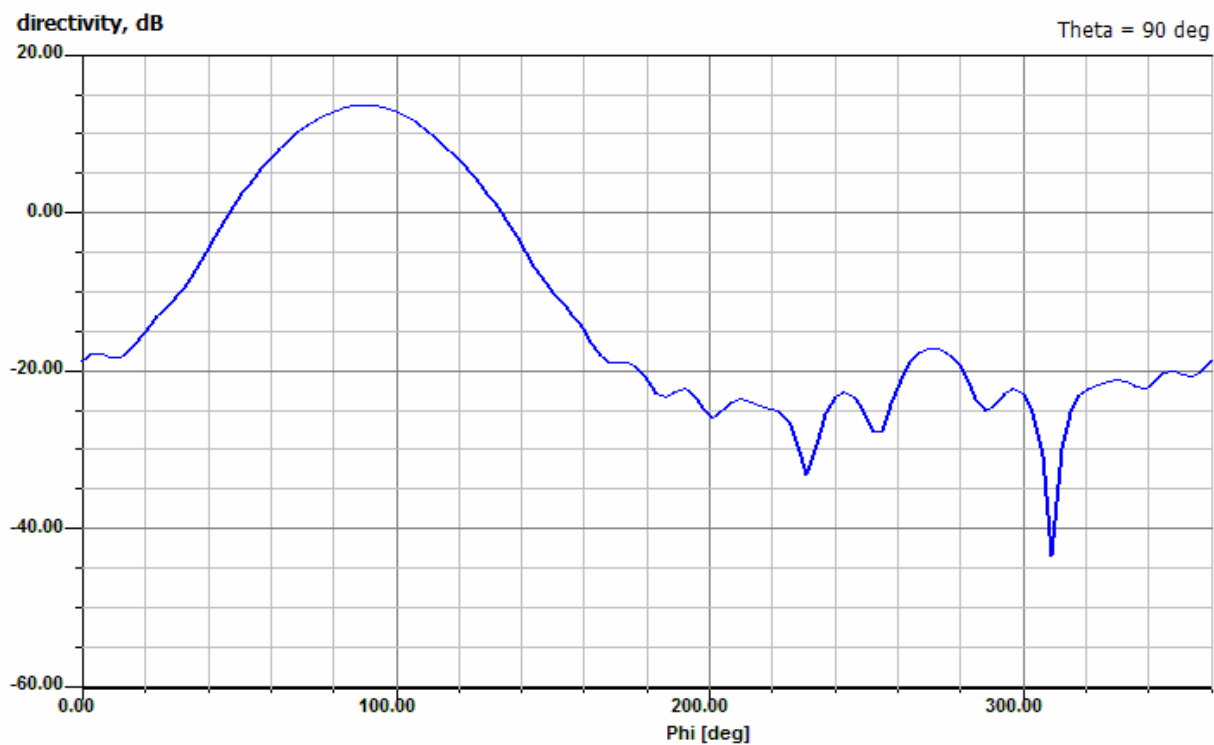
Здесь $T_{\text{cold}} = T_{\text{horn}}$ – шумовая температура «холодного» рупора без потерь при температуре неба $T_{\text{sky}} = 0 \text{ K}$ и шумовой температуре окружения $T_{\text{gnd}} = 290 \text{ K}$;
 горизонтальная поляризация (Hor pol) – вдоль угла между горизонтом и вертикальной стенкой,
 вертикальная (Vert pol) перпендикулярна ей, угол наклона рупора к горизонту – 45° .

Приложение 3. Рупор Скобелева (короткий).

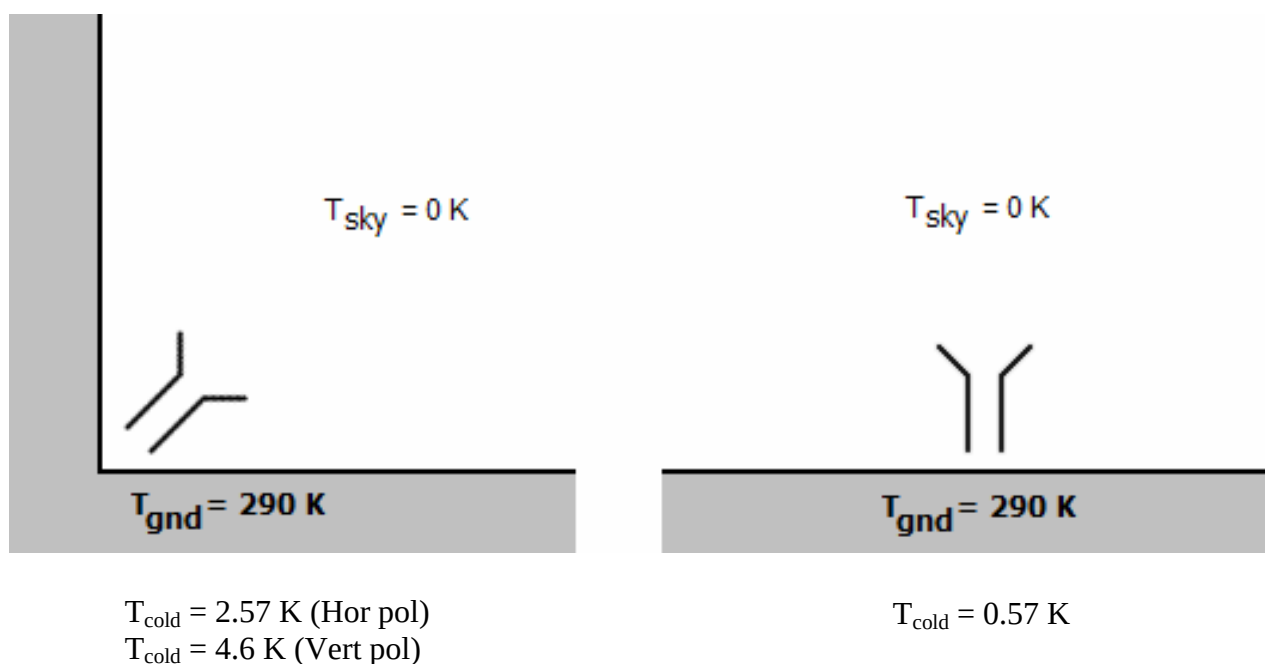
Horn data*:	WR90 (23x10)			
flare len	71.71	mm	2.48	λ
flare diam1	52.05	mm	1.8	λ
flare diam2	37.59	mm	1.3	λ
dMode len	9.00	mm		
dMode diam	29.38	mm	1.016	λ

*sizes by W1GHZ, best f/b and sidelobes,
http://www.w1ghz.org/antbook/conf/optimized_dualmode_feedhorns.pdf.





Шумовые характеристики:



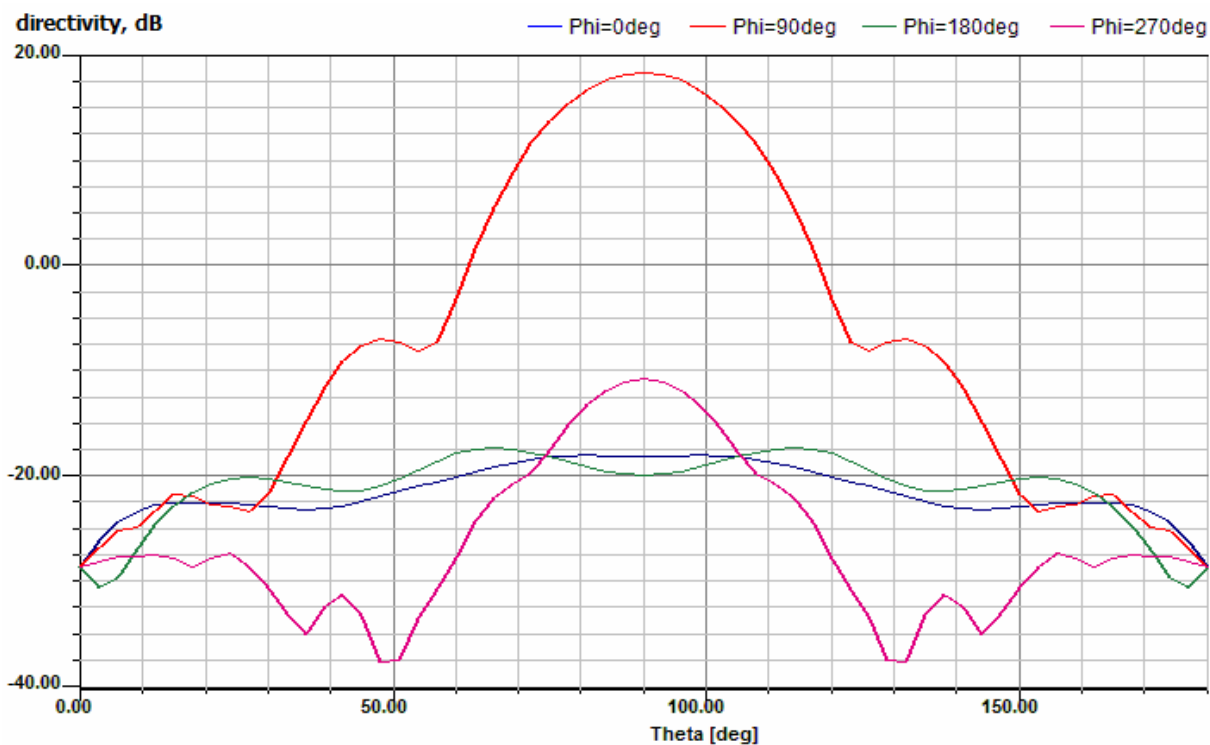
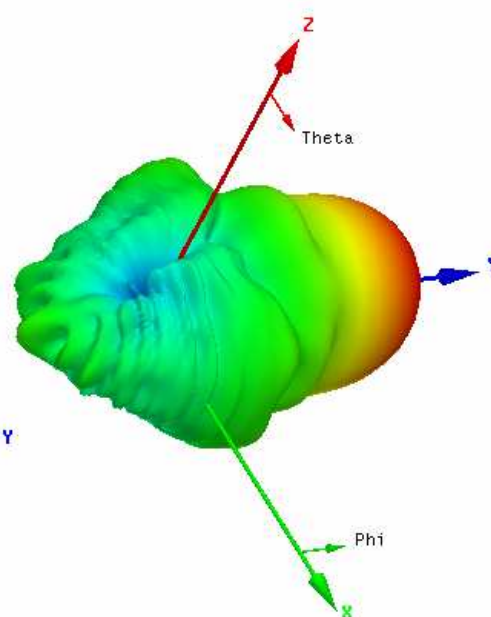
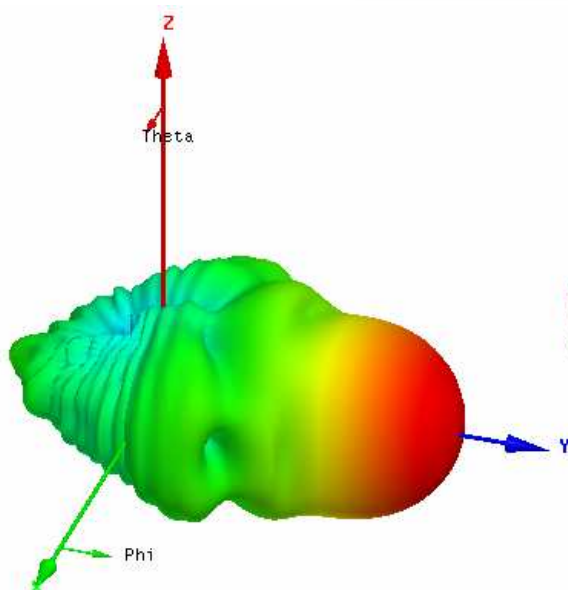
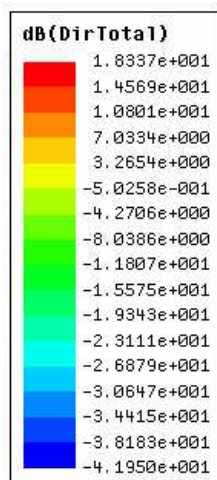
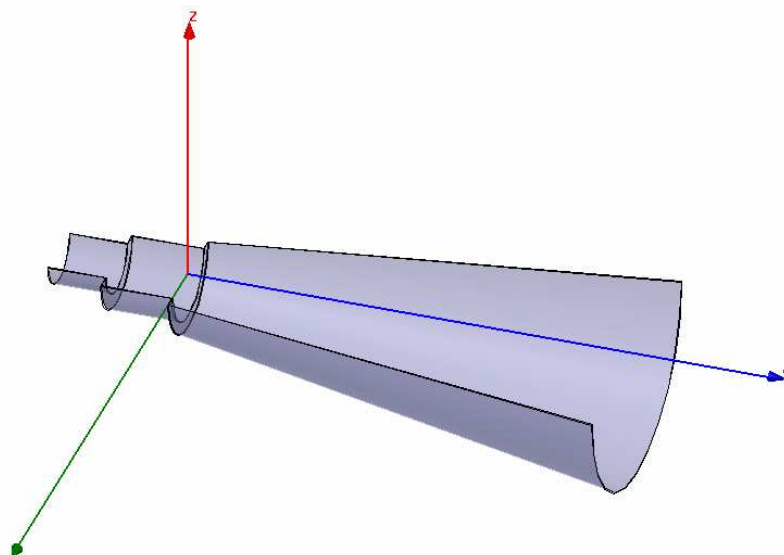
Здесь $T_{\text{cold}} = T_{\text{horn}}$ – шумовая температура «холодного» рупора без потерь при температуре неба $T_{\text{sky}} = 0 \text{ K}$ и шумовой температуре окружения $T_{\text{gnd}} = 290 \text{ K}$;
горизонтальная поляризация (Hor pol) – вдоль угла между горизонтом и вертикальной стенкой,
вертикальная (Vert pol) перпендикулярна ей, угол наклона рупора к горизонту – 45° .

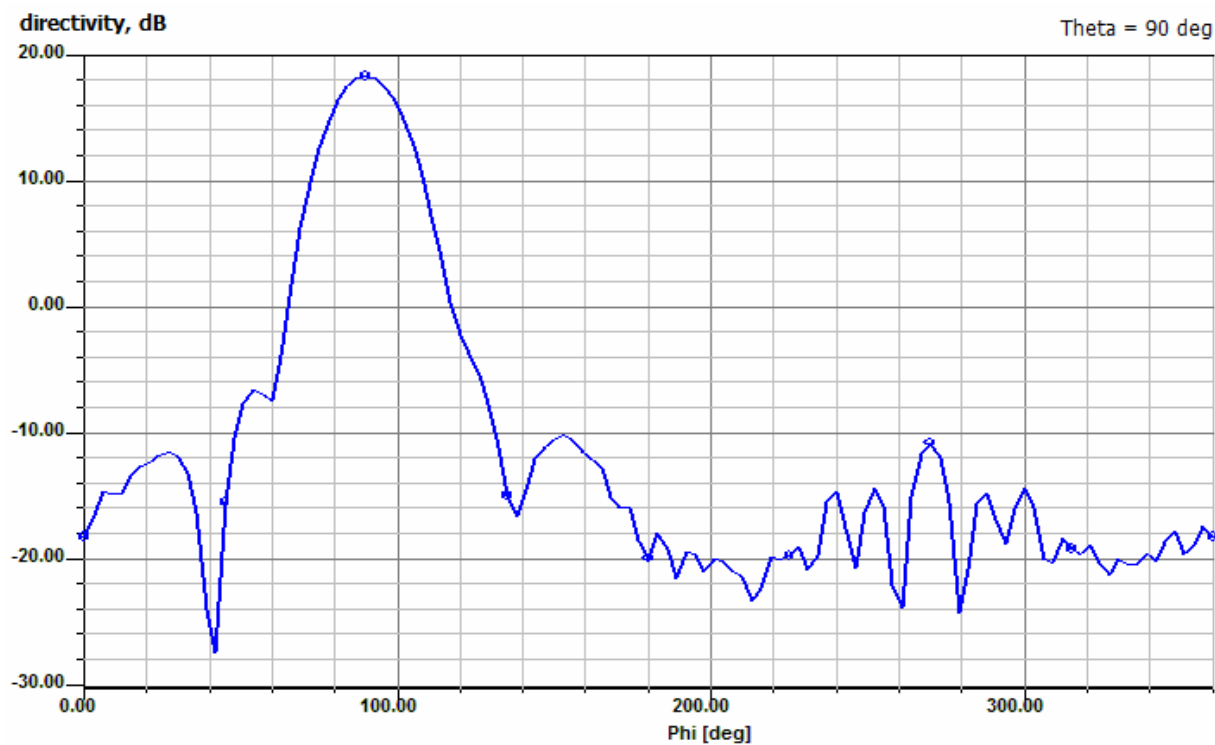
Приложение 4. Рупор Скобелева (длинный, by RA3AQ&RW3BP).

Horn data*:		
flare len	5.01	λ
flare diam1	3	λ
flare diam2	1.31	λ
dMode len	0.8	λ
dMode diam	1.04	λ

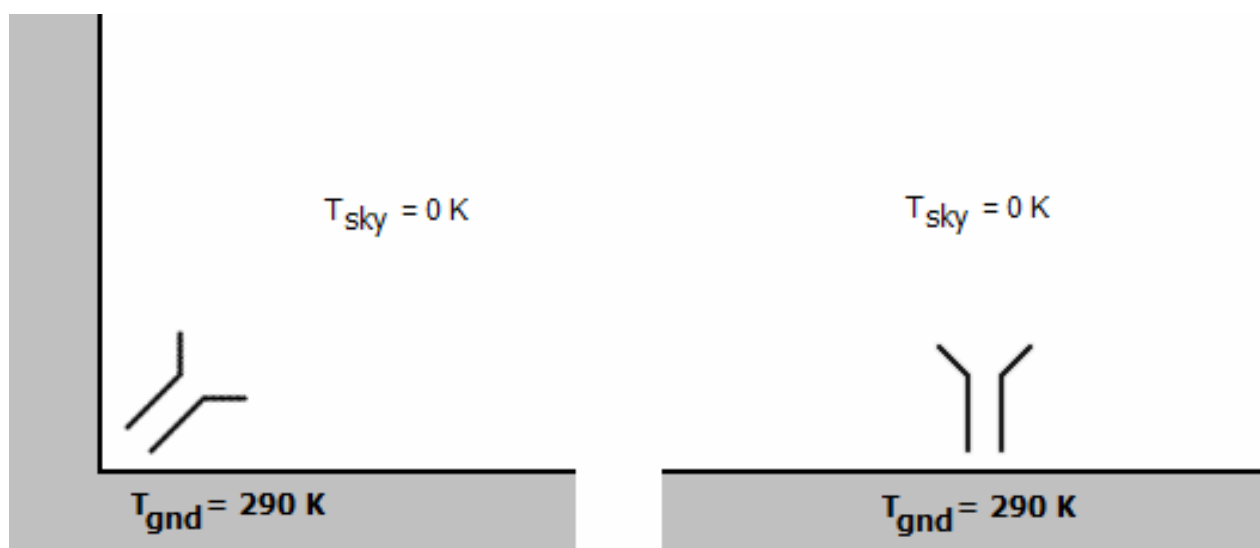
*чертеж с размерами см.

<http://www.vhfdx.ru/fayly/view-details/shemy-i-opisaniya/holodnyiy-rupor-dlya-izmereniya-koeffitsienta-shuma>.





Шумовые характеристики:



$T_{\text{cold}} = 2.03 \text{ K (Hor pol)}$
 $T_{\text{cold}} = 4.32 \text{ K (Vert pol)}$

$T_{\text{cold}} = 1.22 \text{ K}$

Здесь $T_{\text{cold}} = T_{\text{horn}}$ – шумовая температура «холодного» рупора без потерь при температуре неба $T_{\text{sky}} = 0 \text{ K}$ и шумовой температуре окружения $T_{\text{gnd}} = 290 \text{ K}$;
горизонтальная поляризация (Hor pol) – вдоль угла между горизонтом и вертикальной стенкой,
вертикальная (Vert pol) перпендикулярна ей, угол наклона рупора к горизонту – 45° .