

Шум и температура Солнца на миллиметрах.

de UA3AVR, Дмитрий Федоров, 2014-2015

Работа, о которой речь пойдет ниже, касается радиоастрономии, экспериментов, которые можно сделать средствами, доступными в радиолобительских условиях, а по пути узнать много нового, или освежить и обогатить ранее известное, или просто удовлетворить личное любопытство, и за личный же счет, поиграть в прятки с природой или тем, кто создавал этот мир. А где еще можно найти партнера по игре опытнее и честнее? Подобные работы можно встретить: была работа Christian Monstein по шуму Луны на частотах около 10 GHz¹, или Jean-François Lampin F4BAY об измерениях шума Солнца на 76 GHz², правда, больше сосредоточенная на тестировании аппаратуры, нежели на Солнце.

Источники в небе – это то, что всегда можно услышать на миллиметрах, в отличие от корреспондентов для проведения QSO. Хорошо, если в вашем городе есть группа увлеченных миллиметрами людей, и всегда можно друг с другом поэкспериментировать. Мне в этом смысле повезло с диапазоном 76 GHz, благодаря тому, что им уже не первый год занимается Сергей Георгиевич Жутяев, RW3BP, и не повезло с диапазоном 24 GHz, на котором просидел с готовым тропо-комплектom два года без единого корреспондента. Единственный «корреспондент» на момент написания этих строк, который на нем был у меня слышен, это Солнце. В принципе, если искать корреспондентов, есть еще EME, но там размер антенны нужен в разы больше, чем для атмосферного прохождения.

Если речь идет о том, чтобы только услышать что-то, не обязательно стараться попасть именно в рамки любительских диапазонов, слушать небо можно везде, на это лицензия не нужна. Выбор частоты можно сделать, исходя из доступности узлов для создания приемника. Удобный для этого участок это частоты около 38 GHz, поскольку это диапазон радиорелейной связи, и узлы от списанной аппаратуры на 38 GHz можно достать, множество предложений по продаже узлов 38 GHz есть на eBay.

Но просто услышать что-то на частоте, где можно построить приемник при сравнительно малых затратах, еще не так интересно. А вот когда есть какая-то тема познавательного характера, на которую можно будет пролить свет хотя бы для себя, если услышанное приемником облечь в форму неких данных, собрать эти данные, обработать и проанализировать, то это уже что-то, стимулов заняться таким приемником больше, даже если результаты и не пригодятся напрямую для тестирования аппаратуры на любительских диапазонах, или они будут использованы как-то косвенно.

И такая тема для меня нашлась. Просматривал старые статьи по радиоизлучению Солнца, и мое внимание привлек один момент. Солнечная активность, процессы в его пятнах хорошо слышны на низких частотах, на сантиметрах. Что и отражают в изменениях известных индексов потока излучения (solar flux index - SFI), измеряемых на частотах $\cong 2.8$ GHz, которые в основном и служат мерой активности, используются при расчетах и прогнозировании состояния ионосферы и прохождения на коротких волнах (HF). При этом считается, что чем выше частота, тем зависимость шума Солнца и его температуры от активности становится слабее, с ростом частоты все, что добавляется к шуму от процессов в солнечных пятнах вымирает³, и в остатке будет тепловая составляющая или шум «спокойного Солнца»⁴. Ну, и редкие спорадические всплески. А т.н. «медленно меняющаяся» компонента, связанная с активностью, уходит с ростом частоты, и на миллиметрах, после 24-30 GHz должна быть почти незаметна, см. Рис. 1.

Речь идет об интегральном потоке излучения (шума) Солнца, т.е. с усреднением по солнечному диску. Не скажу, насколько это представление корректировалось за последнее время, и были ли

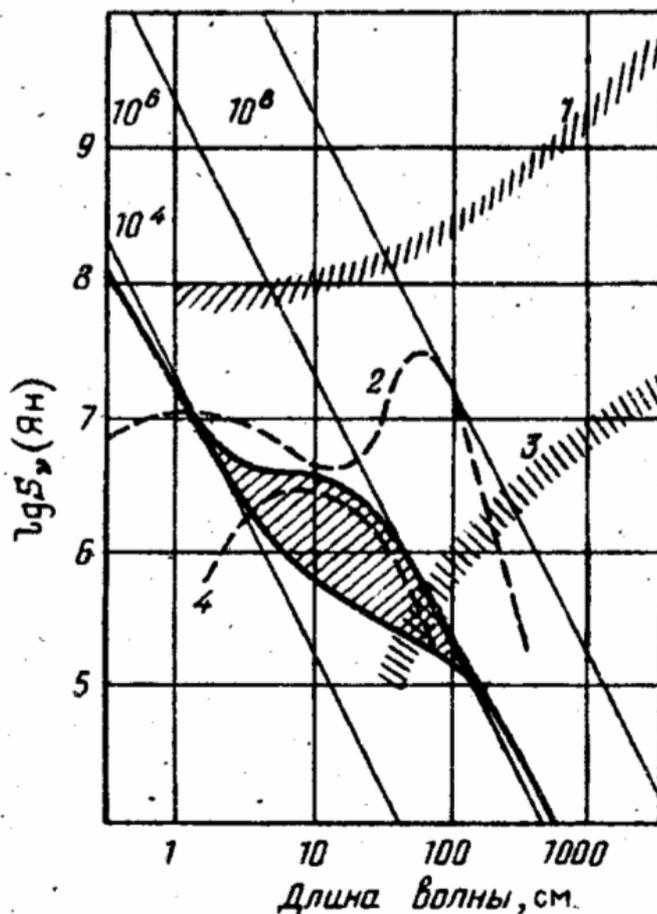
¹ Christian Monstein, *The moon's temperature at lambda = 2.77 cm*, <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:25097>, 2001.

² Jean-François Lampin F4BAY, *Solar noise measurements at 76 GHz*, EME-конференция <http://www.eme2014.fr>, 2014.

³ А там действительно происходят интересные вещи: сильные магнитные поля в пятнах меняют движение заряженных частиц, электронов, возникает т.н. синхротронное или циклотронное излучение, движение частиц под влиянием пятен, как выходит, не дает излучения на миллиметрах или оно мало.

⁴ Железняков В.В., *Радиоизлучение Солнца и планет*, М. «Наука», 1964; *Radio Astronomy Tutorial*, Haystack Observatory, Massachusetts, <http://www.haystack.edu/edu/undergrad/materials/tut8.html>.

соответствующие эксперименты: исследования Солнца в последние десятилетия по большей части были сосредоточены на тонких локальных эффектах, а диаграммы современных радиотелескопов довольно узкие по сравнению с солнечным диском, и могут принимать сигнал из разных его точек, но радилюбительские возможности не столь роскошные, и речь может идти в основном о солнечном потоке излучения, усредненном по диску в целом. Литература по радиоизлучению Солнца довольно обширна, возможно, что-то и пропустил, но для меня, во всяком случае, вопрос о зависимости шума Солнца на миллиметрах от его активности, того, что происходит в солнечных пятнах, вызывал интерес.



Спектры радиоизлучения Солнца:
 1,2 - всплески IV типа, 3 - шумовые бури, 4 - медленный компонент. Сплошные кривые - спектр спокойного Солнца в годы минимума и максимума солнечной активности (область между ними заштрихована). Наклонные прямые соответствуют излучению черного тела при указанной температуре.

Рис. 1. Спектры радиоизлучения Солнца⁵.

Первоначально этот интерес был вызван измерениями шума Солнца на 24 GHz. А кого еще можно было слушать на этом диапазоне? Корреспондентов не было, это было весна-лето 2013. Собирая данные по этим измерениям, включающие, помимо погодных условий, и текущее значение SFI, мне казалось, что зависимость потока солнечного радиоизлучения от этого параметра активности есть. Правда, до серьезной обработки записей с данными измерений на 24 GHz, и с получением температуры Солнца на этой частоте дело дошло уже после того, как были сделаны эксперименты на 38 GHz: прежде у меня просто не было методики обработки. Разброс точек на 24 GHz по всем сделанным измерениям оказался довольно значительный, такой, что судить о наличии зависимости температуры Солнца от SFI было нельзя, см. Рис. 2. Был бы у меня этот график перед глазами сразу, возможно, никакой бы другой работы касательно шума Солнца на миллиметрах бы и не было: график говорил и подтверждал лишь то, что уже давно было известно.

Можно в будущем попытаться снизить разброс, измерять при больших углах элевации⁶, в принципе, есть возможность сделать это с антенной больших размеров⁷. Но пока о том, что получается на частоте 38 GHz.

⁵ График взят из лекций на Факультете Радиофизики Нижегородского Университета им. Лобачевского, <http://www.rf.unn.ru/rus/chairs/k8/courses/astro/%CB%E5%EA%F6%E8%FF10.ppt>.

⁶ Почти все точки на Рис. 2 были сняты при элевации не более 20 градусов над горизонтом. При низких углах над землей поглощение атмосферы сравнительно велико, антенна видит довольно большой ее слой, и к этому

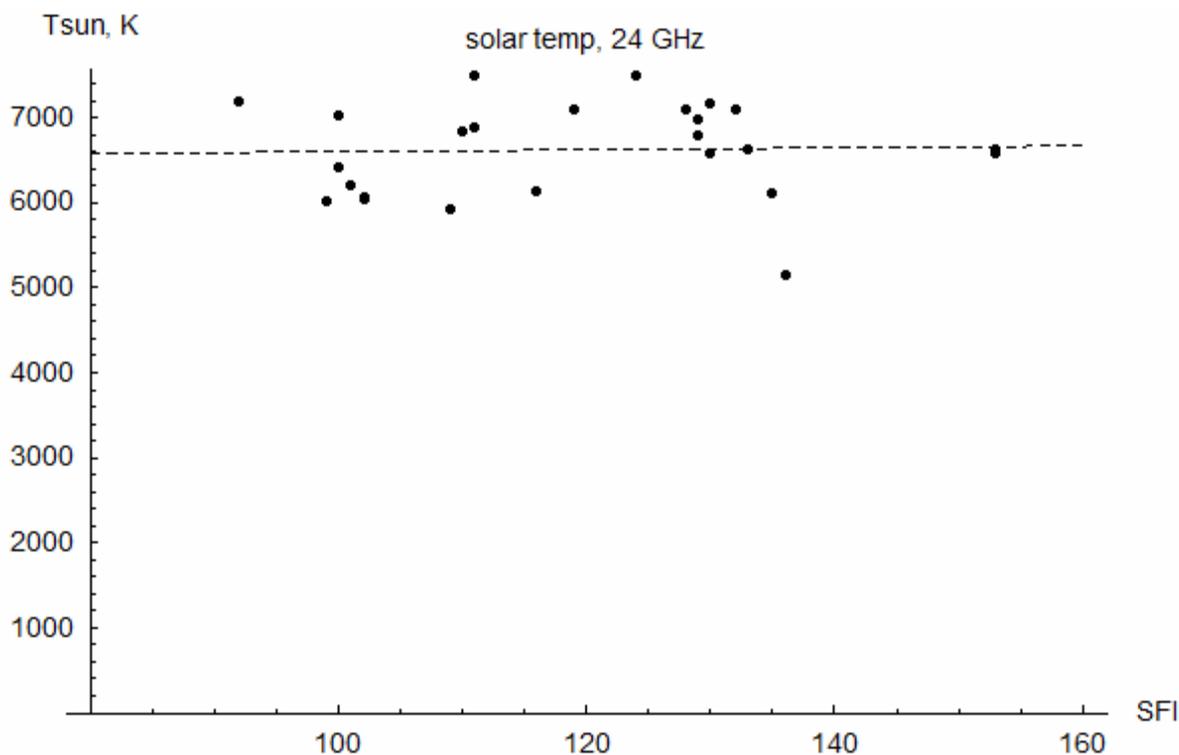


Рис. 2. График зависимости температуры Солнца на 24 GHz от индекса потока солнечного излучения SFI на 2.7 GHz, по данным измерений⁷ весна-лето 2013. Обработка данных - 2014 год. Значения индекса SFI взяты по данным Learmonth Solar Observatory, Australia⁸.

Шум и температура Солнца на 38 GHz

Приемник

Блок-схема приемника показана на Рис. 3, фактически это небольшой домашний радиотелескоп. В антенном блоке используется два преобразования частоты, 38 GHz \rightarrow 2500 MHz, и 2500 MHz \rightarrow 470 MHz, далее по кабелю сигнал идет уже в комнату, где стоит измерительный селективный приемник, настроенный на 470 MHz, фотографии антенной части устройства на Рис. 4. Сделать пошире полосу приемника не получается, к сожалению: измерялся шум в полосе 120 kHz, она не такая уж и большая для измерений шума с хорошей точностью, поэтому пришлось добавить интегрирующую RC-цепочку с постоянной времени в несколько секунд для дополнительного усреднения сигнала на выходе детектора приемника⁹, чтобы снизить ошибку измерения уровня шумового сигнала¹⁰.

Выход приемника – обычный вольтметр, но послушать ушами принимаемый сигнал тоже стоит: частота 470 MHz в городе может быть не такой уж и безопасной в смысле помех, да и услышать что-то шумящее в небе само по себе интересно: кто-то часами может заворуженно смотреть на звездное небо, в зеркальный телескоп или трубу, или просто подняв голову вверх, а кто-то тоже самое испытывает, управляя переключателями движения антенны по азимуту и элевации, и слыша возрастание шума в динамиках приемника, когда лепесток антенны находит что-то горячее в небе.

добавляется то, что на диапазоне 24 GHz оно получается и так повышенное из-за близости линии поглощения водяного пара H₂O на частоте 22.23 GHz. Влияние возможных ошибок расчета поглощения больше, и они влияют на результат обработки данных в итоге.

⁷ При измерениях использовалась антенна с офсетным параболическим зеркалом d=0.6 m, оценка шумовой температуры, приведенной к входу приемной системы (в апертуре антенны) T_{sys}, около 230 K.

⁸ См. <http://www.ips.gov.au/Solar/3/4>, они дают данные для частоты 2.7 GHz.

⁹ Порядка сотых dB, время усреднения порядка 10 секунд. Это оказалось не излишеством, как выяснилось после, если помимо излучения Солнца пытаться принять также термальный шум Луны, который слабее солнечного, и дает прирост шума на выходе приемника в пару десятых dB, см. далее.

¹⁰ Относительная величина которой $\sim 1/\sqrt{T\Delta f}$, где T - время детектирования (усреднения), Δf - полоса шумового сигнала.

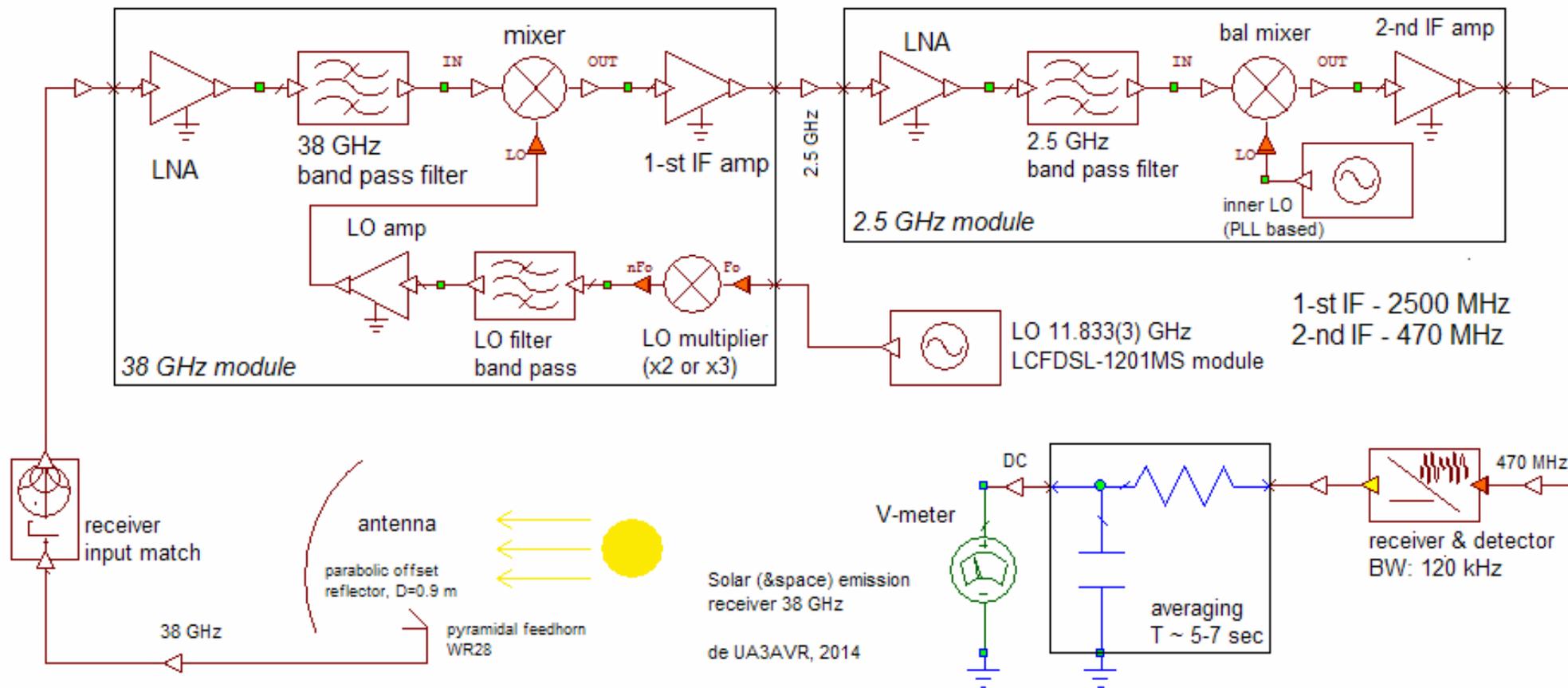


Рис. 3. Блок-схема приемника на 38 GHz.



Рис. 4. Антенная часть приемника 38 GHz.

Приемная антенна с параболическим офсетным зеркалом, диаметр $D=0.9$ m с эквивалентным отношением фокусного расстояния к диаметру зеркала $f/d=0.5$, установлена прямо на балконе жилого дома. Облучатель сделан в виде пирамидального рупора¹¹, в его волноводе есть винты для согласования с входом приемника.

Ширина диаграммы антенны по основному лепестку получается порядка размера солнечного диска¹², расчетное значение ширины по половине мощности 0.6 градуса. Соизмеримая с угловым размером Солнца ширина лепестка добавляет забот при обработке данных измерений, но это проблема решаемая, о ней пойдет речь ниже.

Блок (модуль) 38 GHz приобретен на eBay, пока там подобных вещей в избытке, см. Рис. 5. Потратил некоторое время на его исследование: промежуточная частота как раз в районе 2500 MHz¹³. На нем есть волноводный вход WR28, далее на входе стоит LNA, но насколько согласован

вход с волноводом сказать было трудно, тем более, что достался мне он без задней сплошной стенки, ее пришлось делать самому, а также предусмотреть устройство согласования входа модуля с рупором антенны в виде трех винтов¹⁴. LO формируется с помощью диодного умножителя, можно подавать сигнал из расчета умножения $\times 2$ или $\times 3$, я подавал туда с синтезатора 35500/3 MHz, есть фильтр LO¹⁵. Отдельный вопрос с коэффициентом шума NF по входу. Мне нечем было его померить, оценил его в районе 5-6 dB, и, похоже, эти цифры близки к правде: шумовая температура $T_{sys} \cong 800$ K, приведенная ко входу приемной системы (в апертуре антенны), соответствовала оценке.



Рис. 5. Приемный модуль 38 GHz.

Синтезатор LCDFSL-1201MS, также с eBay, включен и программируется на частоту 35500/3 MHz по алгоритму и программе WW2R-G4FRE¹⁶. На блоке есть входы под внешний опорный сигнал, но они не использовались, стабильности внутреннего TCXO 10 MHz для измерения шума достаточно.

Далее блок обработки первой $IF=2500$ MHz, в нем использовался конвертер для MMDS телевидения с минимальной переделкой: был снят входной облучатель с диполем-вибратором, вместо него сделан вход на SMA-разъеме. Конвертер один из самых доступных, Gossell MDF-10T, усиление у него > 40 dB, сравнительно небольшой шум по входу $NF < 2$ dB. В конвертере частота LO = 2030 MHz, сделан LO на PLL с делителем /256, опорный сигнал берется от кварцевого генератора, и специальных мер по стабилизации также не предпринималось. С выхода конвертера сигнал в 470 MHz шел уже по кабелю в помещение для дальнейшей обработки.

Соотношения для анализа, параметры диаграммы антенны для радиометрии и эффективность ее главного лепестка.

Итак, есть диаграмма антенны с главным лепестком, сравнимым по ширине с угловым размером Солнца. Речь о нем, но результаты применимы и к другим источникам с видимым диском, например, Луне. Если бы лепесток антенны был узкий, охватывал бы только небольшую часть

¹¹ Рупор рассчитан и сделан именно под этот рефлектор, ширина диаграммы рупора по уровню -10 dB около 90 градусов, чертежи рупора см. http://qsl.net/ua3avr/papers/Horn_38GHz_sun_receiver_drafts.pdf (pdf 53 KB).

¹² ~ 0.5 градуса. Размер Луны далее считаем таким же.

¹³ Должен работать с IF от 2000 до 3000 MHz.

¹⁴ Которые механически удобно врезать в волновод WR28 на расстоянии друг от друга около 7 mm ($3/4 \lambda$ в волноводе).

¹⁵ Ниже 11600-11700 MHz на входе «LO» модуля он уже сигнал ослаблял сильно.

¹⁶ Dave Robinson, WW2R, G4FRE, Using the Elcom DFS1201 11.2 to 12GHz Oscillator, <http://g4fre.com/dfs1201.htm>.

диска, то, предполагая равномерность распределения температуры T_{sun} по диску, мы бы имели от источника шумовую добавку на входе приемной системы¹⁷ с температурой

$$T_{ant} \approx \varepsilon_M T_{sun}, \quad (1)$$

где ε_M – эффективность главного лепестка¹⁸. Этот параметр характеризует «зоркость» антенны радиометра, показывает, сколько от видимой температуры источника она способна воспринять, а поскольку делает она это главным лепестком, ее боковые и задний лепесток в приеме полезного сигнала не участвуют, и даже могут собирать посторонний шум извне, с земли и др., то значение ε_M для реальной антенны всегда <1 . Если же лепесток намного шире солнечного диска

$$T_{ant} \approx \frac{\Omega_{sun}}{4\pi} D_{max} T_{sun}, \quad (2)$$

где D_{max} – усиление антенны в максимуме (на кончике главного лепестка, directivity), а Ω_{sun} – т.н. телесный угол, под которым диск Солнца виден из точки наблюдения (расположения приемной антенны), $\frac{\Omega_{sun}}{4\pi}$ – это просто та часть площади на поверхности сферы с единичным радиусом и центром в точке наблюдения¹⁹, которую проекция солнечного диска на эту сферу занимает. В отличие от первого случая с узким лучом, уровень сигнала теперь напрямую зависит от усиления антенны: чем оно больше, тем лучше.

У меня же получилось так, что случай промежуточный, поэтому надо было выбрать некоторую форму главного лепестка антенны, и уже с ее учетом посчитать, сколько он примет от Солнца с температурой T_{sun} , по-прежнему предполагая равномерность распределения температуры по диску. Хорошо бы, если анализ при этом вышел с простыми формулами, в которых можно усмотреть и физический смысл.

Форму лепестка выбрал в виде гауссоиды,

$$D(\rho) = D_{max} e^{-\frac{4 \ln 2 \rho^2}{\delta_{HPBW}^2}}, \quad D_{max} = N \frac{16 \ln 2}{\delta_{HPBW}^2}, \quad (3)$$

ее график, нормированный на 1, т.е. для $\frac{D(\rho)}{D_{max}}$, показан на Рис. 6. Здесь ρ – угловая переменная, отсчитываемая от центра лепестка, δ_{HPBW} – ширина диаграммы по половине мощности, N – нормировочный множитель, который конкретизирую дальше. Температура T_{ant} тогда будет²⁰

$$T_{ant} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\delta_{sun}/2} T_{sun}(\rho) D(\rho) 2\pi \sin(\rho) d\rho, \quad (4)$$

и поскольку мы считаем температуру равномерно распределенной по солнечному диску, то $T_{sun}(\rho) \approx T_{sun}$ и будет той интегральной температурой Солнца, извлекаемой из

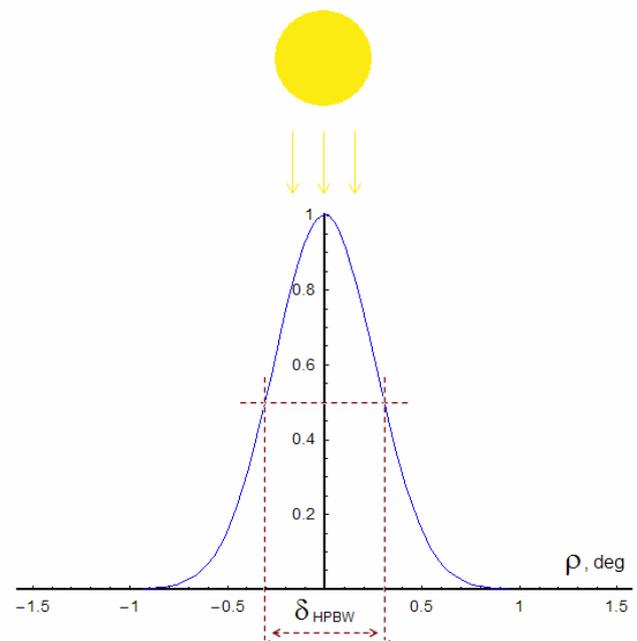


Рис. 6. Расчетная (модельная) форма главного лепестка антенны, диаграмма показана нормированной на 1.

¹⁷ В апертуре антенны. Также пока считаем, что по пути нет потерь в атмосфере, чтобы не усложнять выражения.

¹⁸ Или main beam efficiency. См. также Thomas L. Wilson, Kristen Rohlf, Susanne Hüttemeier, *Tools of Radio Astronomy*, Springer, 2009, <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-85122-6>, page 147.

¹⁹ Площадь единичной сферы равна 4π .

²⁰ См., например, Stanford University School of Engineering materials, http://web.stanford.edu/class/ee252/handouts/antenna_noise.pdf, page 5, или textbooks по радиоастрономии, такие как книга в ссылке¹⁸.

экспериментальных данных при их обработке. Здесь $\delta_{sun} \approx 0.5$ градуса – угловой размер Солнца, центр его диска находится по центру диаграммы, где $\rho = 0$, везде предполагается аксиальная симметрия относительно линии вдоль луча антенны. Также полагаем, что угловой размер диска невелик, и можно считать $\sin(\delta_{sun}/2) \approx \delta_{sun}/2$, $\sin(\rho) \approx \rho$ ²¹. Тогда, подставляя (3) в (4), получается соотношение, выражающее T_{ant} через T_{sun} ,

$$T_{ant} = N \left(1 - 2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \right) T_{sun}. \quad (4a)$$

Множитель N определяется в пределе очень узкого лепестка $\delta_{HPBW} \ll \delta_{sun}$, когда он весь видит только горячее Солнце, и должно быть справедливо соотношение (1). Тогда $2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \rightarrow 0$, получится значение нормировочного множителя $N = \varepsilon_M$, и простое выражение, связывающее температуру Солнца с шумовой добавкой от него на входе (в апертуре) приемной антенны

$$T_{ant} = \varepsilon_M \left(1 - 2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \right) T_{sun}. \quad (5)$$

Двойка в этой формуле отражает как раз то, что ширина луча антенны берется по половине мощности.

Можно получить еще одну полезную формулу, связывающую ε_M и усиление на кончике главного лепестка D_{max} . Для этого рассмотрим другой предел $\delta_{HPBW} \gg \delta_{sun}$, где справедливо соотношение

(2), а Солнце приходится на верхушку лепестка. При этом $1 - 2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \approx \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \ln 2$, и из (5)

получается аналог (2) в принятой модели диаграммы,

$$T_{ant} = \varepsilon_M \ln 2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} T_{sun}. \quad (6)$$

Далее, приравнивая T_{ant} из (2) и (6), а также выражая Ω_{sun} через угловой размер Солнца²², $\Omega_{sun} \approx \pi \frac{\delta_{sun}^2}{4}$, получим соотношение

$$\varepsilon_M = \frac{\delta_{HPBW}^2}{16 \ln 2} D_{max}, \quad (7a)$$

где δ_{HPBW} в радианах, или, если ширина лепестка задается в градусах,

$$\varepsilon_M = \frac{\pi^2}{518400 \ln 2} \delta_{HPBW}^2 D_{max}. \quad (7b)$$

Соотношение (7a) согласуется с множителем в выражении для формы главного лепестка диаграммы антенны (3), если учесть, что нормировочный множитель $N = \varepsilon_M$.

Ну, и еще одно соотношение, связывающее эффективность главного лепестка ε_M с коэффициентом использования поверхности параболической антенны или эффективностью ее

²¹ В этих соотношениях угловые переменные в радианах, не в градусах.

²² По-прежнему предполагая, что этот телесный угол маленький и $\sin(\delta_{sun}/2) \approx \delta_{sun}/2$.

апертуры ε_A (aperture efficiency). Есть такое соотношение для усиления D_{\max} параболической антенны²³

$$D_{\max} = \frac{4\pi A_{\text{geom}} \varepsilon_A}{\lambda^2}, \quad A_{\text{geom}} = \pi \frac{d^2}{4}, \quad (8)$$

где d – диаметр зеркала антенны, λ – длина волны, A_{geom} – геометрическая площадь апертуры зеркала. Для ширины лепестка δ_{HPBW} есть формула

$$\delta_{\text{HPBW}} = 1.22 \frac{\lambda}{d}, \quad (9)$$

используемая в инженерных расчетах «типичных» парабол²⁴, значение δ_{HPBW} она дает в радианах. Подставляя (8) и (9) одновременно в (7а), и обращая результат для ε_A , получим

$$\varepsilon_A = k \varepsilon_M, \quad k = \frac{16 \ln 2}{1.22^2 \pi^2} \approx 0.75. \quad (10)$$

Этот результат, наряду с (5), будет использован в дальнейшем при оценке параметров приемной системы.

В качестве заключения для данного подраздела отмечу, что формула (4) дает возможность использовать какие-то модели, учитывающие неравномерность распределения температуры на видимом диске. Это было бы актуально для Луны²⁵, для которой неравномерности на диске хорошо видны, есть впечатляющие картинки с линиями изофот²⁶. Правда, точность измерений все равно невысока, и вопрос насколько имеет смысл уточнять расчеты остается, но какие-то оценки с учетом неравномерности распределения температуры сделаем.

Y-фактор и его измерение. Шумовой сигнал в апертуре антенны и атмосферное затухание.

Y-фактор получается как отношение уровня максимума шумового сигнала на выходе²⁷ приемника при ориентации антенны на Солнце или Луну к уровню, когда ее главный лепесток ориентирован на холодное небо. Соотношение для Y-фактора, которое я использовал при анализе данных,

$$Y = \frac{T_{\text{hot}} + T_{\text{sys}}}{T_{\text{cold}} + T_{\text{sys}}}, \quad T_{\text{sys}} = T_{\text{rcvr}} + T_{\text{spill}}, \quad (11)$$

где T_{sys} – это температура собственного шума приемной системы²⁸, в котором выделены температура самого приемника T_{rcvr} , а также T_{spill} – температура «протечки» антенны, мера того, сколько антенна собирает постороннего шума (с земли, окружения и т.д.) своими боковыми и задним лепестками, не задействованными в приеме полезного сигнала, T_{hot} и T_{cold} – температуры шумового сигнала в апертуре антенны, когда антенна смотрит на горячее Солнце или иной источник и холодное небо, соответственно.

²³ См. Thomas L. Wilson, Kristen Rohlf, Susanne Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*, Springer, 2009, <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-85122-6>, page 150.

²⁴ См., например, Daniel Minoli, *Satellite Systems Engineering in an IPv6 Environment*, CRC Press, 2009, pages 78-80, <https://books.google.ru/books?id=4yJi1UQDPp8C&pg=PA78>.

²⁵ При зондировании Луны можно откалибровать приемную систему или скорректировать ошибочные значения параметров системы при обработке данных, об этом далее.

²⁶ См., например, Г.М. Рудницкий, Конспект лекций по курсу «Радиоастрономия», Нижний Архыз, 2001, <http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Rudnickij/>, стр. 61. Излучение Луны чисто тепловое, можно ожидать, что распределения температур на ее поверхности для $\lambda = 3.2$ см, справедливы и для других длин волн. Однако зависимость температур от длины волны есть, см. далее.

²⁷ Или приведенные к его входу.

²⁸ В апертуре антенны, которую и считаем входом приемника. T_{rcvr} относится к раскрытию рупора облучателя.

Какие составляющие дают вклад T_{hot} и T_{cold} ? T_{hot} выражается у меня в виде суммы составляющих

$$T_{hot} = \frac{\varepsilon_M}{L_{atm}} \left(2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} T_{CMB} + \left(1 - 2 \frac{\delta_{sun}^2}{\delta_{HPBW}^2} \right) T_{sun} \right) + \varepsilon_M \left(1 - \frac{1}{L_{atm}} \right) T_{atm}. \quad (12)$$

Здесь учтено приходящее от Солнца или иного небесного источника, точнее, то, что способна воспринять антенна, если по пути до нее ничего не потеряется и не добавится. Но этот путь все-таки не будет беспроблемным, и далее сигнал с неба будет ослаблен слоями атмосферы, через которую он проходит, пока доберется до приемной антенны. Ослабление в линейных единицах в (12) обозначено как $L_{atm} > 1$. Еще будет добавка, связанная с тем, что атмосфера, как большой аттенюатор сигнала, сама шумит. Шум атмосферы характеризуется здесь ее температурой T_{atm} , а выражение (12) это, фактически, формула аттенюатора для атмосферы, когда все процессы происходят в пределах поля зрения главного луча антенны, что учитывается множителем ε_M .

Кроме того, есть еще всегда присутствующий и неснижаемый фон реликтового излучения из космоса (cosmic microwave background - CMB). Я не уверен, что Солнце для него прозрачно, если луч антенны узкий и главный лепесток весь упирается в диск, но его точно надо включать, если Солнце на кончике лепестка, т.е. когда луч значительно шире Солнца на небе. Оставляем в расчетах T_{CMB} как есть. У нас случай промежуточный, хотя температура реликтового излучения мала по сравнению с тем, что дает Солнце, есть приличный шум атмосферы $T_{atm} \cong 275$ К, есть немалые T_{spill} и T_{rcvr} , оценку им дадим дальше. Отвлекаясь на CMB и говорю о нем несколько подробнее, в том числе, из познавательных мотивов: происхождением реликтового излучения мы обязаны ни много ни мало процессам, которые происходили в эволюции ранней Вселенной, при образовании атомов и молекул после Большого Взрыва, его температура невелика ≈ 2.725 К, а эквивалентная шумовая температура T_{eq} , характеризующая интенсивность излучения, на миллиметрах будет еще меньше за счет квантовых эффектов, $\cong 1.9$ К на 38 GHz. Оценить ее можно по формуле

$$T_{eq} = \frac{hf}{k(e^{hf/kT} - 1)}, \quad (13)$$

где f – частота, Hz, $h = 6.62607 \cdot 10^{-34}$ J*s – постоянная Планка, $k = 1.38064852 \cdot 10^{-23}$ J/K – постоянная Больцмана. Иногда встречал, что температуру берут больше $\cong 3.4$ K²⁹, возможно, из соображений, что антенна из космоса принимает все равно немного больше из-за галактического шума и других источников, которые могут попасть в ее апертуру, и которые мы явно не учитываем. Сам использовал значение $T_{CMB} = 3.4$ К в расчетах, но уже не стал корректировать вычисления: ожидаемые ошибки в результатах все равно в разы больше по сравнению с возможной ошибкой CMB в сумме со всем, что попадает еще из открытого космоса, помимо чисто реликтового излучения, и что все равно трудно учесть.

Идем далее. В величине T_{cold} будет все, за исключением добавки от источника, Солнца или того, чей шум слушаем,

$$T_{cold} = \frac{\varepsilon_M}{L_{atm}} T_{CMB} + \varepsilon_M \left(1 - \frac{1}{L_{atm}} \right) T_{atm}. \quad (14)$$

Из структуры (12) и (14) можно сделать важный вывод для практических измерений: фиксацию уровня шума на выходе приемника, соответствующего холодному небу, нужно делать при том же угле элевации антенны, под которым виден и источник. Т.е. отводить антенну в сторону холодного неба для измерений его шума надо только по азимуту. Дело в том, что при разных углах элевации антенна видит слои атмосферы разной толщины, соответственно, ее поглощение и

²⁹ Как в EME калькуляторе у VK3UM.

шум получаются разными, причем, на миллиметрах поглощение в атмосфере заметное, в ней всегда есть пары воды H_2O , некоторые частоты приходится близко к линиям поглощения кислорода O_2 . Если мы меняем угол элевации, что надо поменять и значения в (14), что добавляет проблем, число которых увеличивать бы не хотелось, если на то нет веских оснований. Их, по крайней мере, я не видел, пока делал эксперименты с шумом Солнца на 38 GHz.

Теперь о конкретных значениях L_{atm} и T_{atm} . На затухание в атмосфере и ее шум влияют влажность воздуха, температура, давление, причем с высотой они меняются. Соответственно, на разной высоте у слоев атмосферы будут разные параметры затухания и создаваемого ими шума, а сигнал к нам приходит из космоса, и по пути пройдет через все эти слои. Однако доступными нам параметрами, характеризующими метеоусловия и состояние атмосферы, будут лишь влажность, температура и давление, измеренные у земли. Есть такая методика определения затухания в атмосфере, рекомендованная ИТУ³⁰, судя по количеству редакций, уже более-менее обкатанная и зарекомендовавшая себя на практике. Использует она только данные о погоде с наземных станций. В тексте есть утверждение о ее точности в 10%, возможно, так оно и есть, хотя у меня доля внутреннего скепсиса по поводу этого утверждения не исчезает до сих пор, вопросы остаются. Эту методику использует VK3UM в своем калькуляторе Atmosphere³¹, использую ее, в том числе, и на 10 GHz для расчетов температуры холодного рупора при измерениях шумовых параметров приемных устройств на этой частоте, т.е. обращался к ней довольно часто.

По методике сначала рассчитывается затухание A_{90° в толще атмосферы в зенитном направлении, результат она дает в dB. Расчетные формулы для A_{90° здесь не привожу, они довольно громоздкие, если что, всегда можно открыть ссылку³⁰ и их посмотреть. Далее рассчитывается затухание с определенным наклоном к горизонту с помощью простого и геометрически понятного соотношения $A = \frac{A_{90^\circ}}{\sin \theta}$ (dB), где θ - угол над горизонтом или элевация. Оговаривается диапазон углов, при которых такой расчет дает приемлемую точность, от 5 до 90 градусов. Соответственно, для L_{atm} имеем

$$L_{atm} = 10^{\frac{A_{90^\circ}}{10 \sin \theta}}. \quad (15)$$

По поводу температуры T_{atm} также сошлюсь на рекомендацию ИТУ «Radio noise»³². Там, фактически, используется для расчета шумов атмосферы формула, аналогичная (12) или (14) с эквивалентной шумовой температурой атмосферы, и указывается ее значение $T_{atm} = 275$ К как «обычно используемое». Ну, и я его тоже использовал в (12) и (14).

Да, еще замечание по поводу затухания в атмосфере и шума. Методика работает в ясную погоду, как появляются облака или дождь, или, скажем, есть туман, можно сворачивать измерения, в качестве источника данных они не годятся. Шум Солнца, допустим, услышать можно, даже не видя его сквозь облака, убедиться в работоспособности приемника тоже, только получить реалистическую оценку атмосферного затухания во время осадков, или просто с плотными облаками на небе трудно, если вообще возможно. Плотность облаков, водяного пара в них обычно неизвестна, интенсивность дождя тоже, они здорово влияют на затухание СВЧ на трассе, а на миллиметрах затухание зависит от них критически. Без знания этого затухания определить, сколько шума от источника было на входе в поглощающую атмосферу не выйдет.

Остается выписать формулу для извлечения T_{sun} , она получается из (5), (11), (12) и (14),

$$T_{sun} = \frac{\epsilon_M T_{CMB} (Y - 2^{-\delta_{sun}^2 / \delta_{HPBW}^2}) + (Y - 1) (\epsilon_M T_{atm} (L_{atm} - 1) + (T_{rcvr} + T_{spill}) L_{atm})}{\epsilon_M (1 - 2^{-\delta_{sun}^2 / \delta_{HPBW}^2})}. \quad (16)$$

³⁰ См. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en> в редакции от сентября 2013, Annex 2.

³¹ См. <http://www.vk3um.com/atmosphere%20calculator.html>.

³² См. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.372/en> в редакции от сентября 2013, формула (10).

И еще при измерениях не забывать, что если на выходе приемника, как на Рис. 3, стоит простой вольтметр, то его показания при определении результата измерения по Y-фактору нужно брать в квадрате,

$$Y_{measured} = \frac{V_{hot\ source}^2}{V_{cold\ sky}^2}, \quad (17)$$

Y-фактор везде подразумевается, как отношение энергетических характеристик сигналов, не силовых.

Калибровка приемника по Луне, коррекция параметров приемной системы

Луна удобна в этом смысле, все ее радиоизлучение теплового характера, это просто разогретый Солнцем шарик. Поскольку ничего там не происходит, как на Солнце, где идут бурные процессы в плазме, возникают пятна с магнитными полями, и, соответственно, к тепловому излучению может добавиться еще много чего, ждать каких-то сюрпризов от Луны не приходится. Хорошо бы только знать ее температуру, чтобы понять, сколько мы тут, находясь на Земле, будем с нее иметь в антенне, сравнить ее с температурой холодного неба, Рис. 7, которую мы можем как посчитать, так и измерить. Собственно, эти соображения и привели меня к идее проверить и скорректировать параметры моей приемной системы по Луне. Кроме того, у Луны те же угловые размеры на небе, что и у Солнца, главный лепесток антенны видит ее так же.

Есть, правда, еще возможность сравнить шум небо/земля, подняв антенну в небо, а после, уперев ее главным лучом в землю, получить соответствующий Y-фактор, посмотреть, какую температуру увидит антенна. У меня, к сожалению, тут не все гладко: антенна, если куда и упирается при ее опускании, так это в соседние дома, уверенности в том, что она там принимает в точности шумовую температуру, равную по величине показаниям термометра за окном, нет. Меньше эта температура будет, скорее всего, соседний дом не очень похож на абсолютно черное тело (black body) все-таки. Но в качестве дублирующего теста для калибровки приемной системы земля пойдет, тем более что и с Луной, как позже выяснилось, тоже не все гладко.

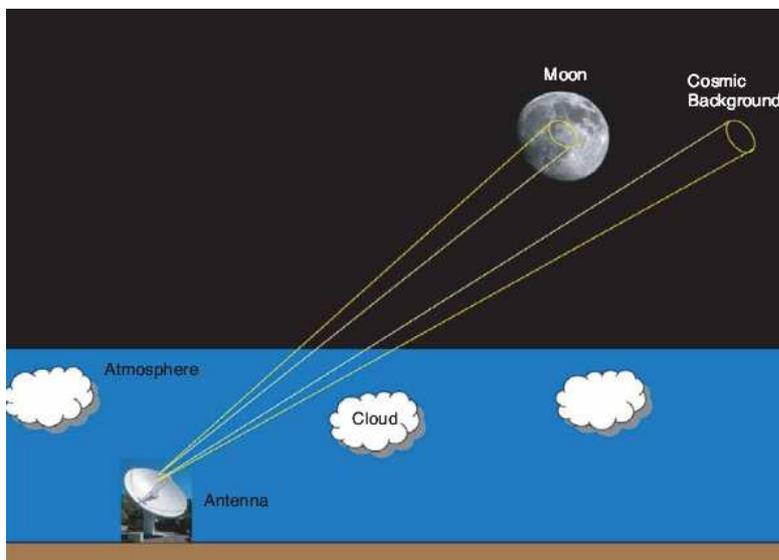


Рис. 7. Процесс калибровки приемной системы по Луне, рисунок взят из³⁵.

Идея с Луной оказалась не такая уж и плохая, чтобы ни прийти в голову и другим людям, занять их время, а также выделить под ее разработку гранты. В поиске литературы по температуре Луны нашел такую статью Jeffrey Linsky, 1973, см. ссылку³³. Занимаюсь ведь я практически тем же! Довольно информативная и полезная по содержанию, есть цифры, по которым можно ориентироваться, и на нее еще ссылаются, кстати³⁴, цифры эти оказываются полезными не только для меня.

³³ Jeffrey Linsky, *A Recalibration of the Quiet Sun Millimeter Spectrum Based on the Moon as an Absolute Radiometric Standard*, Solar Physics, v.28, pp.409-418, 1973, SpringerLink: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00152312>, также см. <http://adsabs.harvard.edu/full/1973SoPh...28..409L>.

³⁴ Shun Ishii et al., *Development of a Transportable Telescope for Galactic Survey at 500 GHz in Antarctica*, 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology, Tokyo, 2-4 April, 2012, <http://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2012/2012110113.pdf>.

Работает идея и используется Луна для калибровки приемных систем до сих пор, см. работу³⁵, картинка, показывающая процесс калибровки, Рис. 7, оттуда.

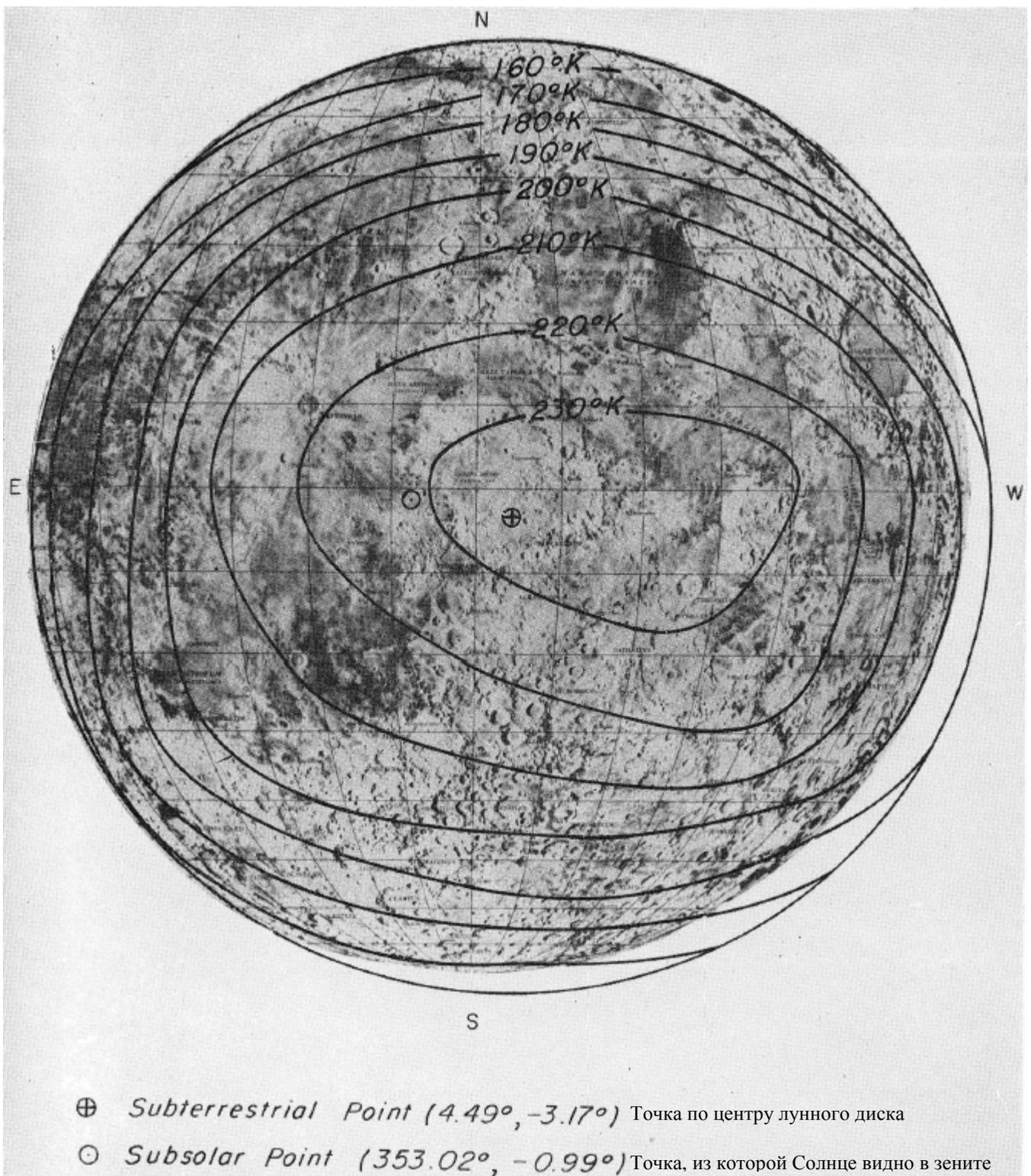


Рис. 8. Тепловая карта Луны, $\lambda=8.6$ мм, фаза освещенности 11.7 градуса. Источник Clardy&Straiton³⁶, отсчет лунной фазы: 0 градусов – это полнолуние.

³⁵ D. Morabito, M. Gatti, and H. Miyatake, *The Moon as a Calibration Load for the Breadboard Array*, Interplanetary Network (IPN) Progress Report 42-172, pp. 1-21, February 15, 2008, http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-172/172G.pdf.

Итак, Луна. Для нее есть картинки распределения температуры по поверхности, снятые недалеко от нашей частоты, в районе 35 GHz, см. Clardy&Straiton³⁶ и Рис. 8, там показаны распределения температуры с изофотами, хотя мы и будем ориентироваться на интегральную температуру. В центре диска температура выше, чем у краев, кроме того, как распределения, так и температура в центре зависят от фазы освещенности Солнцем, см. Рис 9. Фаза Луны на Рис. 8 близка к полнолуннию.

Эту зависимость можно облечь в формулы при помощи гармонического анализа по периоду обращения Луны вокруг Земли, и выделяют постоянную составляющую температуры с ее первой гармоникой,

$$T_{moon} = T_{b_0} + T_{b_1} \cos(\Phi_M - \varphi) , \quad (18)$$

где Φ_M – фаза Луны, отсчет фазы идет от полнолуния. Параметры гармоник показаны на Рис. 10. Цифры для (18) с зависимостью от частоты приводит Patricia Foster³⁷,

$$T_{b_0} = 213 \pm 6 \text{ К}, \quad T_{b_1} = (30 \pm 5) \lambda^{-0.67} \text{ К}, \quad \varphi = \left(\frac{\pi}{5} \pm \frac{\pi}{25} \right) \lambda^{0.275} \text{ rad}, \quad \lambda = 0.1 \div 3 \text{ cm}, \quad (19)$$

где длина волны λ берется в см в диапазоне от 0.1 до 3 см.

Интегральную температуру с моей антенной можно было бы ждать немного меньше цифр для центра Луны. Остается только ответить на вопрос, что это именно «немного», а не «намного». По хорошему, надо бы как-то смоделировать распределение температуры по диску, просуммировать по диаграмме главного лепестка в (4), формула (16), дающая видимую температуру источника, как-то изменится с учетом того, что она будет тогда давать температуру в центре Луны. На это «немного» указывает сравнение цифр по (19) при $\lambda = 2.77$ см с интегральной температурой Луны, которую измерял Christian Monstein³⁸ на этой длине волны, причем также на сравнительно простом оборудовании, используя спутниковый конвертер и тарелку, и детектором с логарифмическим усилителем AD8307 на выходе приемного устройства.

Но попробовать все-таки сделать какую более ощутимую и определенную оценку стоит. Можно сравнить эту разницу для распределения на Рис. 8, т.е. для фаз близких к полнолуннию. Для описания поля температур берем функцию в виде гауссоиды

$$T_M(\rho) = T_{moon} e^{-\frac{4 \ln 2 \rho^2}{\delta_{moon}^2} \sigma^2}, \quad (20)$$

где угловая переменная ρ отсчитывается от центра диска, $\delta_{moon} \approx \delta_{sun} \approx 0.5$ градуса, σ – безразмерный параметр, характеризующий неравномерность распределения (чем он больше, тем сильнее перепад температур от центра к краям), для картинки на Рис. 8 $\sigma \approx 0.72$, и по-прежнему везде предполагается аксиальная симметрия вдоль луча антенны и до центра диска. Подставляя (20) вместо $T_{sun}(\rho)$ в (4), и выполняя интегрирование с учетом малости углов δ_{moon} и ρ , можно получить в итоге аналог (5), но уже для неравномерно нагретого лунного диска,

$$T_{ant} = \varepsilon_M \left(1 - 2 \frac{\delta_{moon}^2}{\delta_{HPBW}^2} \sigma^2 \right) \left(\frac{\delta_{HPBW}^2 \sigma^2}{\delta_{moon}^2} + 1 \right)^{-1} T_{moon}. \quad (21)$$

Чтобы понять насколько мы переоцениваем интегральную шумовую температуру Луны, если примем равномерное распределение по диску с температурой в центре T_{moon} , надо сравнить результат T_{ant} по (21) с ним же, но при $\sigma = 0$.

³⁶ D.E. Clardy and A.W. Straiton, Radiometric Measurements of the Moon at 8.6- and 3.2-Millimeter Wavelengths, The Astrophysical Journal, v. 154, p. 775 (1968), <http://adsabs.harvard.edu/full/1968ApJ...154..775C>.

³⁷ Patricia R. Foster, Radio Observations in the Short Microwave Region, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, v. 10, p.206 (1969), <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969QJRAS..10..206F>.

³⁸ Christian Monstein, The moon's temperature at $\lambda = 2.77$ cm, <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:25097>, 2001.

Для $\delta_{moon} = 0.5$ градуса, $\delta_{HPBW} = 0.6$ градуса и $\sigma = 0.72$ отношение будет около 0.85, т.е. разница в районе 15%. Много это или нет? Если сравнить с ошибками параметров в (19), то про это и правда можно употребить слово «немного»: хоть мы и выходим за пределы диапазона ошибок, но недалеко, цифры получаются сравнимые.

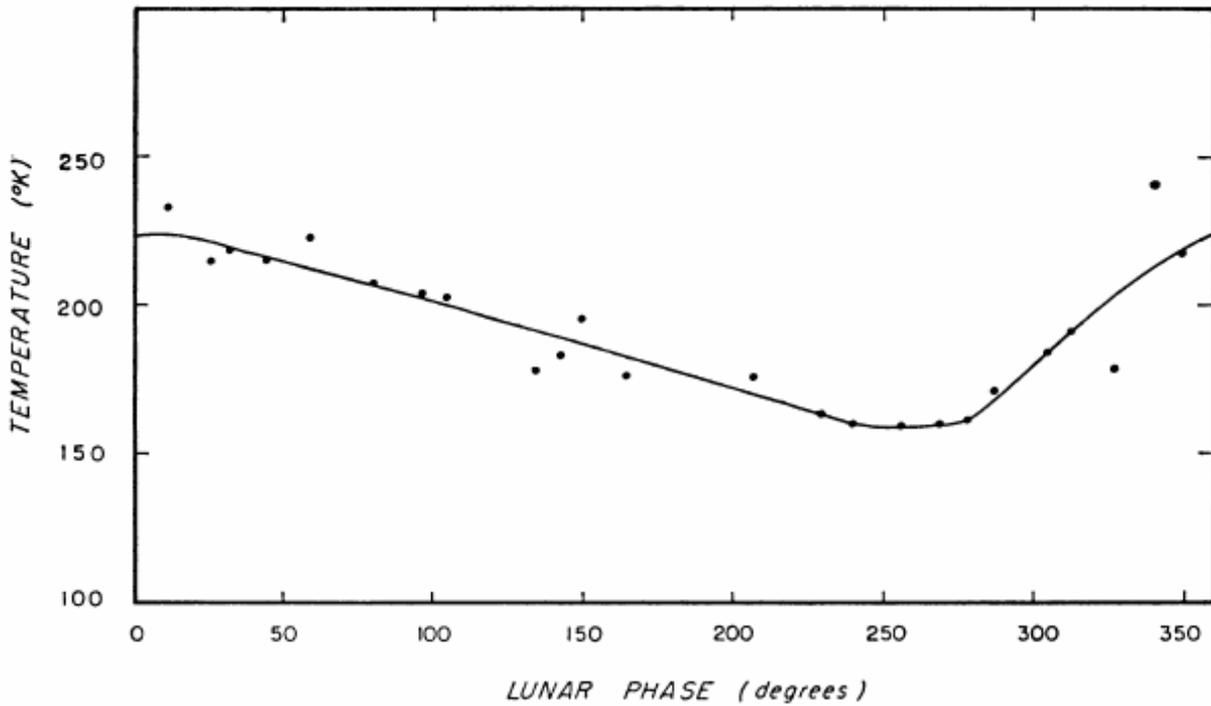


Рис 9. Зависимость температуры в центре диска Луны от фазы освещенности, $\lambda = 8.6 \text{ mm}^{36}$.

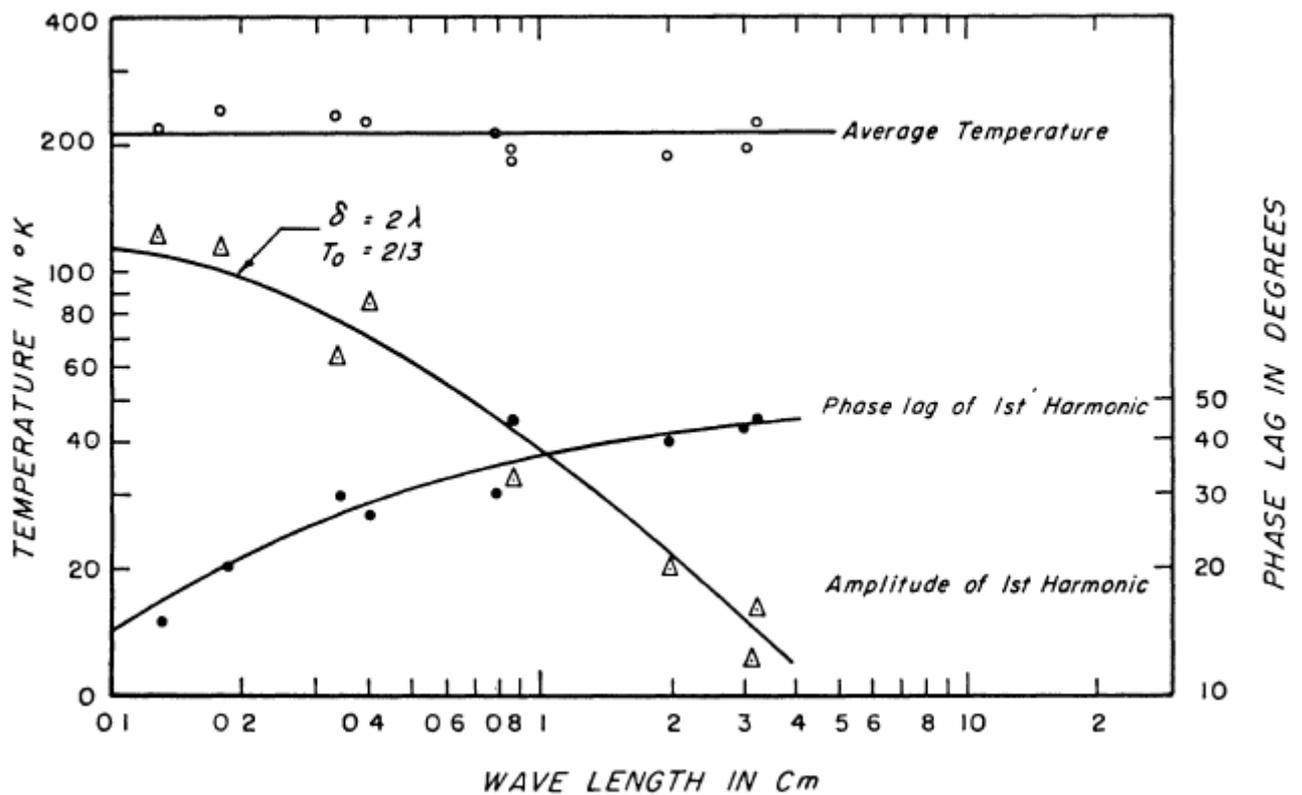


Рис. 10. Параметры гармонического анализа (по фазе освещенности) шумовой или электромагнитной температуры Луны с зависимостью от длины волны³⁶.

Лунный аналог формулы (16) будет выглядеть так:

$$T_{moon} = \frac{\left(Y - 2^{-\delta_{moon}^2 / \delta_{HPBW}^2} \right) \epsilon_M T_{CMB} + (Y - 1) \left(\epsilon_M T_{atm} (L_{atm} - 1) + (T_{rcvr} + T_{spill}) L_{atm} \right) \left(\frac{\delta_{HPBW}^2 \sigma^2}{\delta_{moon}^2} + 1 \right)}{\epsilon_M (1 - 2^{-\delta_{moon}^2 / \delta_{HPBW}^2 - \sigma^2})}, \quad (22)$$

результат по ней – температура в центре Луны. Использовать ее лучше для фаз, близких к полнолунию.

Оценки параметров моей приемной системы, скорректированные с учетом измерений Луны и отношения земля/небо получились такие (Таблица 1), с этими цифрами выполнялся анализ данных.

Таблица 1. Параметры приемной системы.

Параметр	Название или комментарий	Значение
d	Диаметр рефлектора антенны	0.9 m
D_{max}	Усиление	48.1 dBi
ϵ_M	Эффективность главного лепестка (main beam efficiency)	0.67
ϵ_A	Коэффициент использования поверхности (aperture efficiency) = $k \epsilon_M$	0.50
δ_{HPBW}	Ширина главного лепестка по половине мощности	0.61 градуса
NF	Коэффициент шума по входу (в раскрыве облучателя антенны)	5.5 dB
T_{spill}	Температура (шумовая) «протечки» антенны	70 К
T_{sys}	Температура приемной системы = $T_{spill} + T_{rcvr}$ (в апертуре антенны)	809 К

Результаты по Луне: Y-фактор – 0.23 dB при атмосферном затухании 0.84 dB, видимая температура Луны в центре диска с учетом коррекции по (22) \cong 268 К, расчетная по (19) \cong 247 К, измерялась убывающая Луна, освещенность 96.4%, фаза \cong 20 градусов.

При этом измерения шума земли дают Y-фактор 0.72 dB при атмосферном затухании 0.78 dB, видимая шумовая температура земли по формуле (A1) из Приложения А \cong 278 К, что кажется нормальным, и было по погоде, но ожидать эту цифру можно с разбросом в десятки градусов³⁹.

Обработка данных. Графики солнечной температуры и другие результаты.

Данные для обработки собирались в период с середины сентября 2014 по двадцатые числа ноября 2014. За это время значение индекса SFI на 2.7 GHz по данным Learmonth Solar Observatory⁴⁰ успело побывать как около 100, так и выше 200, с диапазоном значения индекса активности мне, похоже, повезло. Измерения производились в Москве, координаты расположения антенны 55°45'33"N 37°45'37"E, высота над уровнем моря около 185 m. Эксперименты проводились в ясную погоду, в момент измерения фиксировались давление и влажность (для последующего расчета атмосферного затухания) по данным одной из московских метеостанций в реальном времени⁴¹. Фиксировалось значение максимума уровня сигнала от Солнца при движении антенны по азимуту и элевации, далее антенна отводилась по азимуту от Солнца и снимался уровень шума холодного неба, вычислялся Y-фактор, и одновременно рассчитывалось атмосферное поглощение при текущем угле элевации. Измерения проводились в диапазоне углов элевации 20–35 градусов, типичное значение Y-фактора около 5 dB, поглощение в атмосфере по расчету в районе 1 dB или меньше. Всего получено точек – 80, некоторые из них были сняты в течение дня при одном значении SFI⁴², и, если сгруппировать точки по дням, то получится 25 групп данных для разных значений SFI.

³⁹ Неопределенность в этой цифре, а равно и как возможные ошибки в калибровке по Луне мы учитываем в неопределенности ϵ_M и берем допуск на NF приемника при подсчете неопределенности результатов по T_{sun} .

⁴⁰ См. <http://www.ips.gov.au/Solar/3/4>.

⁴¹ <http://www.meteoinfo.ru/zaoknom>.

⁴² Обновление данных по SFI Learmonth Solar Observatory обычно происходит ежедневно, в ночное время по Москве.

Все имеющиеся точки по температуре Солнца T_{sun} без сортировки по какому-либо признаку и обработки их массива показаны на Рис. 11. Кажется, что какая-то зависимость температуры от активности есть, линия по наименьшему среднеквадратическому отклонению явно не горизонтальная, но сырой массив точек надо еще как-то обработать, извлечь неопределенности,

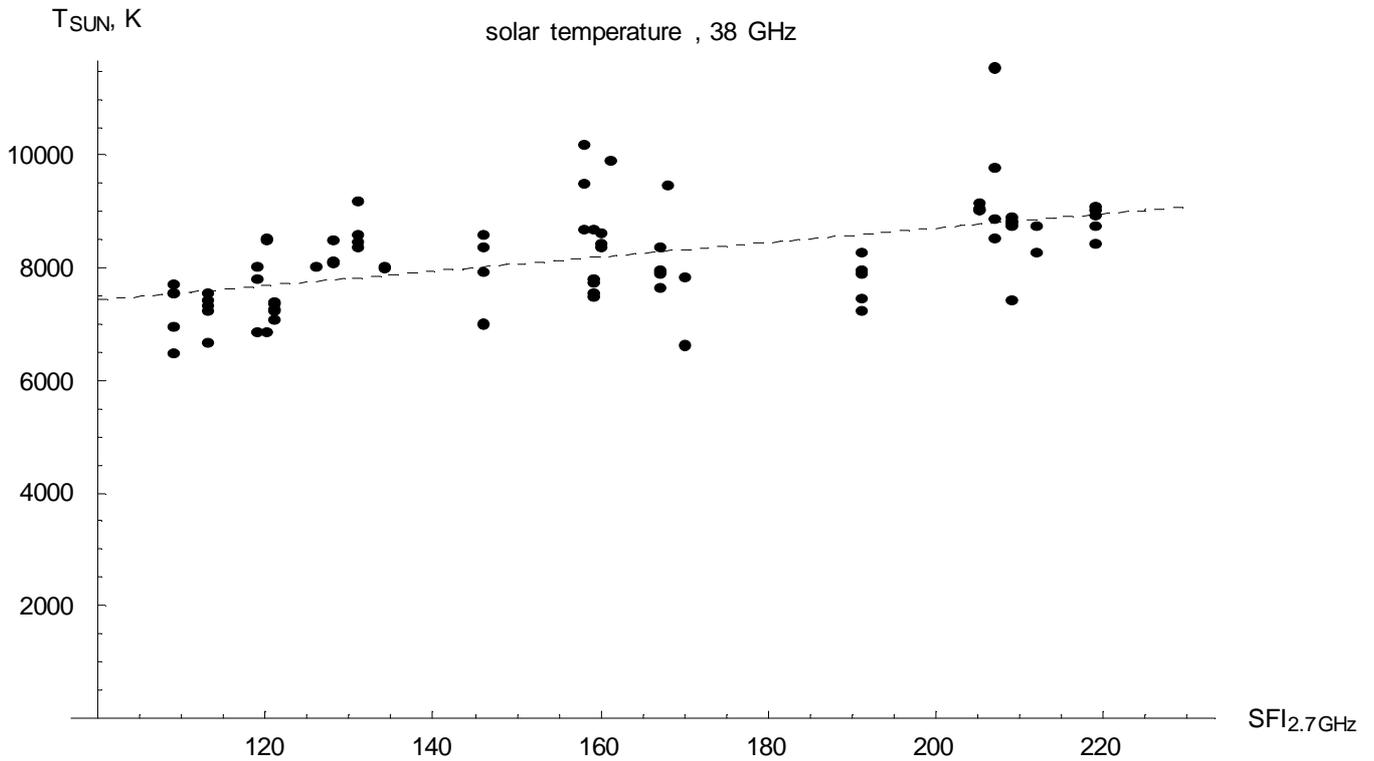


Рис. 11. Точки по температуре Солнца T_{sun} , полученные в период сентябрь 2014 – ноябрь 2014.

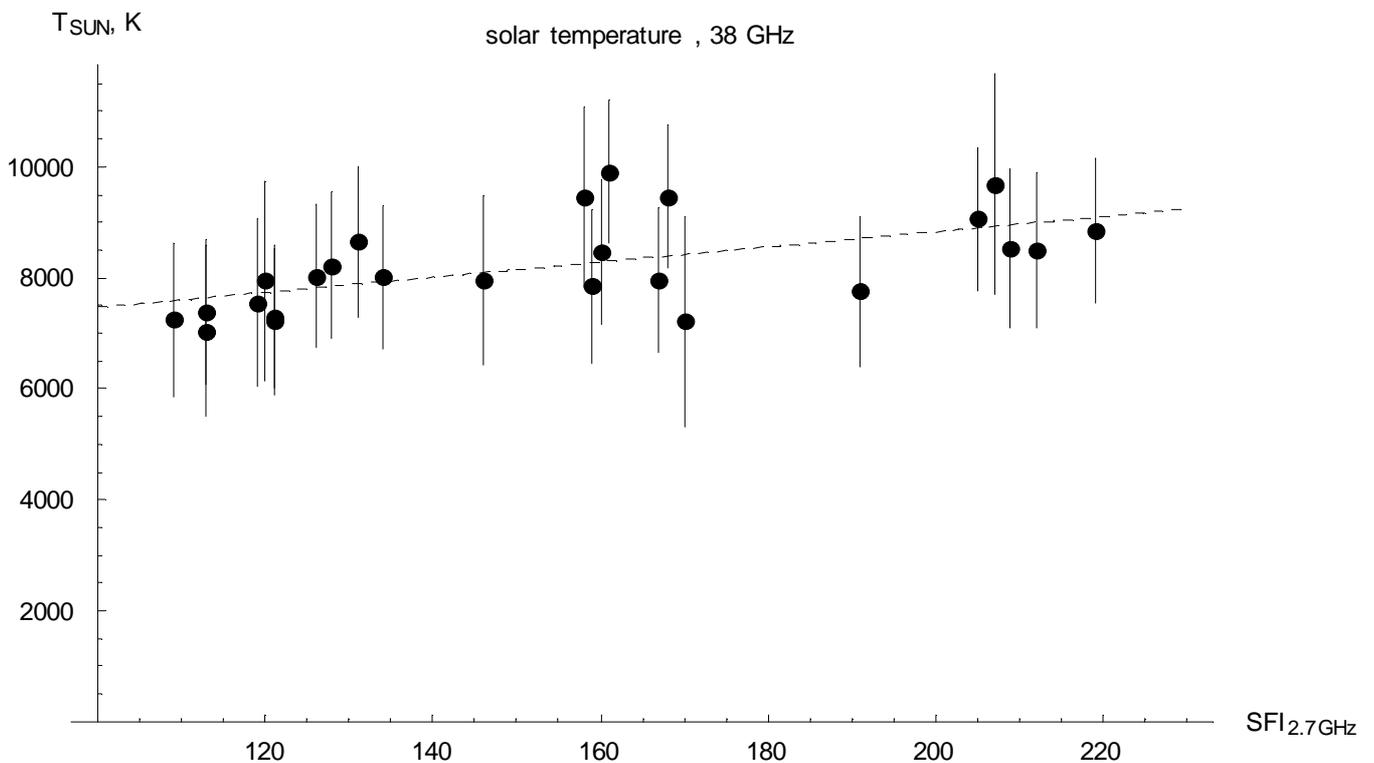


Рис. 12. Результат по температуре Солнца T_{sun} после обработки массива данных с группировкой по дням (разным значениям SFI) в период сентябрь 2014 – ноябрь 2014. Линии неопределенности в точках показаны с уровнем доверительной вероятности 95%.

вычислить температуру в состоянии «спокойного Солнца» с помощью экстраполяции.

Точки я группировал по дням: изменения в SFI мне доступны были только с периодом в сутки, поэтому каждой группе соответствовало одно значение SFI. По точкам каждой из групп вычислял среднее, принимая его за результат, соответствующий данному значению SFI, а также вычислял статистическое стандартное отклонение для этого среднего, получая, таким образом, неопределенность типа А (см. недавно переведенный ГОСТ по неопределенности измерений⁴³),

$$\delta T_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}, \quad \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (23)$$

где n – число точек в дневной группе, \bar{T} – среднее или результат измерения для данного дня. Второй тип неопределенности, тип В – это инструментальный. Ее оцениваю величиной $\Delta T = \pm 1400$ К с распределением ошибки по треугольному виду плотности вероятности, см. Рис. 13. Тогда для стандартной неопределенности типа В получится

$$\delta T_B = \frac{\Delta T}{\sqrt{6}}. \quad (24)$$

Итоговая неопределенность типа С или расширенная с уровнем доверительной вероятности 95% будет вычисляться, как статистическая сумма δT_A и δT_B , они полагаются независимыми или некоррелированными, с умножением на коэффициент 2.26,

$$\delta T = 2.26 \sqrt{\delta T_A^2 + \frac{\Delta T^2}{6}}, \quad (25)$$

она и считается итоговым результатом по неопределенности измерения к его результату \bar{T} ⁴³. Для уровня доверительной вероятности 99% коэффициент в (25) следовало бы взять равным 3 вместо 2.26. Оценку для ΔT взял при типичном во время экспериментов случае, $L_{atm} = 0.78$ dB, $Y = 5$ dB,

$$\Delta T^2 = \left(\frac{\partial T_{sun}}{\partial Y} \right)^2 \Delta Y^2 + \left(\frac{\partial T_{sun}}{\partial L_{atm}} \right)^2 \Delta L_{atm}^2 + \left(\frac{\partial T_{sun}}{\partial T_{rcvr}} \right)^2 \Delta T_{rcvr}^2 + \left(\frac{\partial T_{sun}}{\partial T_{spill}} \right)^2 \Delta T_{spill}^2 + \left(\frac{\partial T_{sun}}{\partial \epsilon_M} \right)^2 \Delta \epsilon_M^2, \quad (26)$$

где ΔY брался с допустимой ошибкой измерения Y-фактора 0.3 dB, $\Delta L_{atm} = 0.02$ из расчета 10%-ной точности методики³⁰, ΔT_{rcvr} определялся из допуска по коэффициенту шума ± 0.4 dB, $\Delta T_{spill} = \pm 30$ К, $\Delta \epsilon_M = \pm 0.025$ ⁴⁴.

И так для каждого дня измерений, всего 25 дней или точек по SFI в диапазоне от 109 до 219. Результат показан на Рис. 12. Линия по наименьшему среднеквадратическому отклонению

$$T_{sun}(SFI) = 6099 + 13.7 SFI, \text{ К} \quad (27)$$

температура «спокойного Солнца» при экстраполяции к $SFI_{quiet} = 90$ будет $T_{quiet} = 7328 \pm 604$ К. Эта цифра недалеко от приводимой Jeffrey Linsky $T_{quiet} = 7760$ К для длины волны 8 mm, см. Table III³³, с

⁴³ Неопределенность измерения, часть 3, Руководство по выражению неопределенности измерения, ГОСТ Р54500.3-2011 (ISO/IEC guide 98-3:2008), <http://vsegost.com/Catalog/52/52043.shtml>.

⁴⁴ Неопределенность по эффективности главного лепестка $\Delta \epsilon_M$, а также допуск по коэффициенту шума приемника учитывают возможные ошибки калибровки приемной системы.

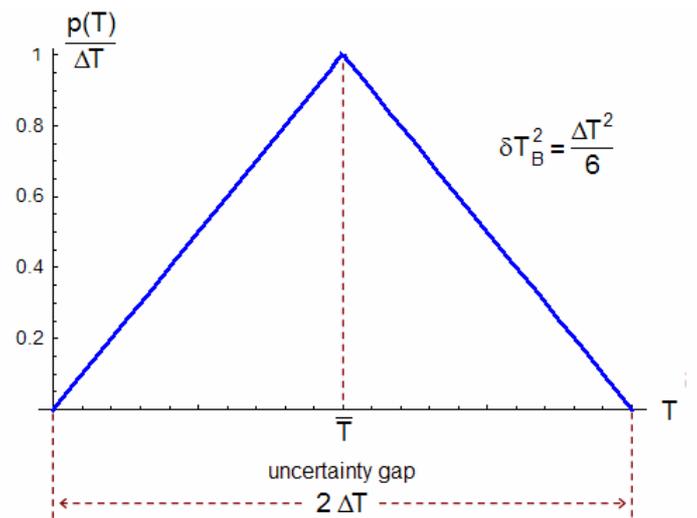


Рис. 13. Плотность вероятности распределения инструментальной ошибки.

учетом оценки неопределенности ΔT_{quiet} попадание более чем приличное⁴⁵. Если взять $SFI_{quiet} = 64$, как это было сделано у Ken Tapping⁴⁶, то $T_{quiet} = 6973 \pm 802$ К, что также согласуется с имеющимися данными.

Обсуждение и еще кое-какие ссылки по радиоизлучению и радиометрии Солнца.

Зависимость температуры Солнца (27) от параметра активности кажется не такой уж сильной по сравнению с сантиметровым диапазоном. Диапазон SFI, в котором удалось провести измерения, от 109 до 219, т.е. практически в два раза. Это означает изменение потока солнечного излучения $S_f \sim T_{sun}$ на 2.7 GHz в те же два раза, тогда как температура на 38 GHz поднялась только на 20%.

Большие радиотелескопы с узкими лепестками диаграммы позволяют снять температуру в областях диска, где нет пятен, т.е. нет факторов влияния активности: так делают, когда хотят увидеть напрямую температуру «спокойного Солнца». В том числе и на миллиметрах, оставляя возможность влияния активности на поток излучения и, соответственно, на интегральную температуру и в этом частотном диапазоне.

Об излучении, связанном с пятнами, в диапазоне длин волн 8 mm упоминала Patricia Foster⁴⁷ со ссылкой на Salomonovich, 1962. На него ссылаются и другие, в том числе Jeffrey Linsky³³, и как раз в связи с исследованиями на 8 mm. Мне, к сожалению, пока не удалось найти работы этого автора, чтобы сказать что-то более подробно: видимо, остались они только в библиотечных фондах в бумажном виде.

Тем не менее, общее представление о том, что на миллиметрах доминирует тепловая составляющая, не связанная с активностью, остается. На Рис. 14 я перенял график солнечного спектра в широком диапазоне из работы 2008 года⁴⁸, он обзорного характера. Авторы работы также проделали анализ приемных характеристик антенны, подобный описанному выше, но с более сложной формой диаграммы антенны и с использованием численных методов в анализе, но учитывающей при этом в диаграмме, помимо главного, также задний и боковые лепестки,

$$P_n(\rho) = \left(\frac{2J_1\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \rho\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \rho} \right)^2, \quad (28)$$

где $J_1(\rho)$ – функция Бесселя 1-го порядка, а ρ – угловая переменная, отсчитываемая от центра главного лепестка. В (28) диаграмма нормирована на 1. Такой подход позволяет рассчитать, например, эффективность главного лепестка ϵ_M , а не вводить его в качестве параметра, выбираемого априори и корректируемого при калибровке приемной системы.

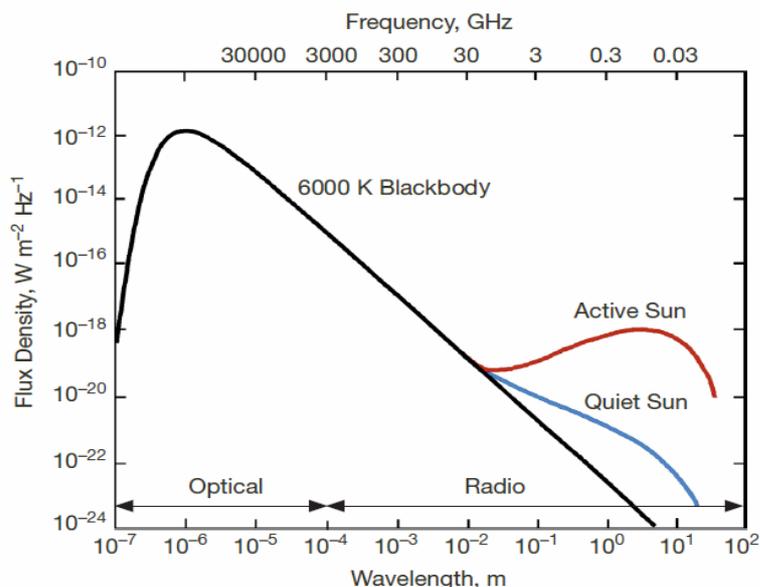


Рис. 14. Спектр солнечного излучения в широком диапазоне длин волн⁴⁸.

⁴⁵ Формулу расчета ΔT_{quiet} по известным неопределенностям за каждый день также привожу, см. Приложение В.
⁴⁶ Ken Tapping, *Antenna Calibration Using the 10.7cm Solar Flux*, Radar Calibration and Validation Specialty Meeting, Albuquerque, New Mexico US, 13-14 January 2001, American Meteorological Society, ftp://ftp.cima.fcen.uba.ar/pub/T-NOTE/JOE/TNOTE-Q&A/RADCAL_V2/pdf/radcal-12-tapping_solar_flux.pdf, page 17.
⁴⁷ Patricia R. Foster, *Radio Observations in the Short Microwave Region*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, v. 10, (1969), <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969QJRAS..10..206F>, page 207.
⁴⁸ Christian Ho, Stephen Slobin, Anil Kantak, and Sami Asmar, *Solar Brightness Temperature and Corresponding Antenna Noise Temperature at Microwave Frequencies*, Interplanetary Network (IPN) Progress Report 42-175, pp. 1-21, November 15, 2008, http://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-175/175E.pdf.

Не исключено, что частоты порядка 38 GHz относятся к переходному участку, и выше по частоте влияние солнечных пятен и активности Солнца на поток излучения и температуру будут меньше. Это стоило бы проверить аналогичными экспериментами, например, на любительском диапазоне 76 GHz. Ну, и в перспективе остаются еще более аккуратные измерения на 24 GHz также.

И еще одна интересная ссылка о проекте радиометра на частоту 36.8 GHz⁴⁹. Предназначен он для изучения солнечных вспышек, которые дают заметные всплески, в том числе, и на миллиметрах, см. Рис. 1. Всплески, правда, редкие и не очень долгие по времени: чтобы их зафиксировать, за Солнцем надо следить непрерывно. В проекте небольшая по размеру антенна, около 60 см, главный лепесток широкий, даже шире, чем у меня, т.е. этот радиометр предназначается для измерения интегральных характеристик излучения Солнца. Радиочастотная часть на чипах по 0.25 μm BiCMOS технологии. Сам приемник прямого усиления, в нем LNA, фильтр и Square Law детектор мощности прямо на принимаемой частоте, блок обработки, см. Рис. 15. Коэффициент шума приемника 4.8 dB. Все это миниатюризировано и делается компактно для микро- и наноспутников. Упоминаю этот проект также потому, что интегральные измерения солнечного излучения сегодня в принципе востребованы, что радиоастрономия это не только огромные зеркала с лепестками минутных и секундных ширин и криостатируемыми антенными узлами.

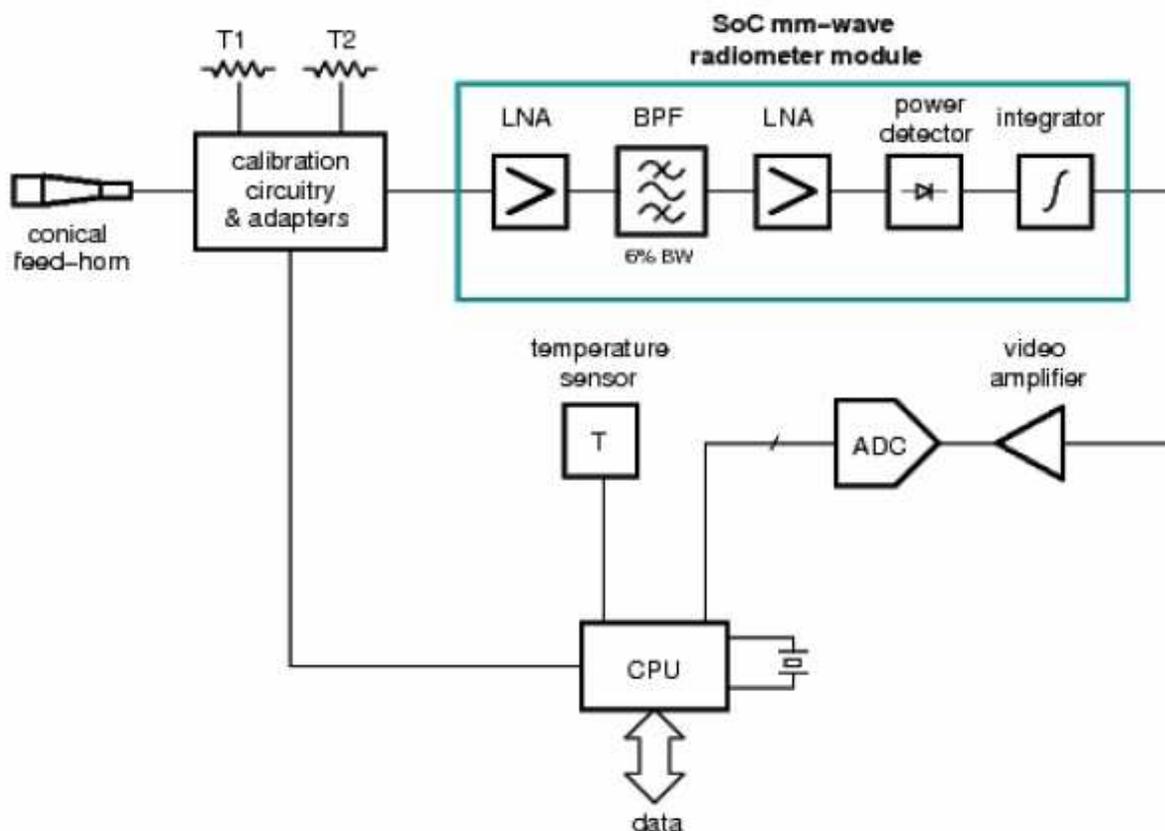


Рис. 15. Блок-схема приемника в проекте радиометра для измерения интегральных характеристик солнечного излучения и с размещением на спутниках⁴⁹.

Время, потраченное на эту работу.

Приблизительно с августа 2014 по август 2015, включая изготовление приемника, измерение, обработку, и написание этой записки⁵⁰. И еще, возможно, работа не закончена. Во-первых, есть задумки на перспективу, во-вторых, не исключено, что появится в периодике или книгах что-то,

⁴⁹ L. Aluigi, L. Roselli, S. M. White, and F. Alimenti, System-On-Chip 36.8GHz Radiometer for Space-Based Observation of Solar Flares: Feasibility Study in 0.25 μm Size BiCMOS Technology, Progress In Electromagnetics Research, v. 130, pp. 347-368 (2012), <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=12061101>.

⁵⁰ Правда, кое-что было готово и раньше, тарелка с поворотными механизмами уже висела, нужно было только смонтировать приемник на кронштейн.

позволяющее взглянуть по-новому на сделанное, что-то, возможно, я не учел и понадобится ревизия работы.

Благодарности.

Радиоловительскому УКВ сообществу и Российскому УКВ порталу⁵¹ за внимание к этой работе. Особенная благодарность Сергею Георгиевичу Жутяеву, RW3BP за работу, связанную, в том числе, с радиометрией Юпитера на 77.5 GHz⁵², хотя она и не вполне оправдала его ожидания. До сих пор под впечатлением от нее, и даже пользовался похожими обозначениями для эффективности главного лепестка, ε_M и для КИП параболических антенн, ε_A ⁵³. И еще благодарности тому, кому спасибо говорят редко: это составители и переводчики пособий и стандартов для оценки неопределенности измерений⁴³, на мой взгляд, хорошие и правильные с философской точки зрения в том числе.

Приложение А.

Привожу формулу для расчета видимой температуры земли T_{ground} по измеренному отношению (Y-фактору) шумов земли и холодного неба. От (16) она отличается тем, что в ней не учитывается космический шум и влияние атмосферы для «горячей» температуры, $T_{hot} = \varepsilon_M T_{ground}$ вместо (12), а также принимается во внимание, что главный лепесток антенны принимает шум земли целиком, множитель коррекции на его ширину не нужен,

$$T_{ground} = Y \left(\frac{T_{CMB}}{L_{atm}} + \left(1 - \frac{1}{L_{atm}} \right) T_{atm} \right) + \frac{(Y-1)}{\varepsilon_M} (T_{rcvr} + T_{spill}). \quad (A1)$$

Приложение В.

Приведу также без вывода формулу для расчета неопределенности ΔT_{quiet} по известным неопределенностям ΔT_i за каждый день измерений (или для каждого значения SFI_i)

$$\Delta T_{quiet} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(S_1 - SFI_{quiet}) SFI_i - (S_2 - SFI_{quiet}) S_1}{S_1^2 - S_2^2} \right)^2 \Delta T_i^2}, \quad S_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SFI_i, \quad S_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SFI_i^2. \quad (B1)$$

Здесь n – это число точек или значений SFI.

Дополнения и корректировки, вторая половина августа 2015.

Скорректированы формулы (12), (14), (16) и (22): учтено затенение реликтового излучения Солнцем или Луной, учет затенения потянул за собой еще корректировку на то, что путь сигнала от источника до антенны он только в секторе видимости главного лепестка антенны⁵⁴. Реликтовое излучение и его шум вроде бы и незначительны, эквивалентная температура небольшая, но эффект затенения чувствуется при расчете лунной температуры, если Y-фактор Луны небольшой, десятые dB. Когда оказывается, что ошибка расчета температуры Луны по (19) порядка 8-10 К, а эффект затенения дает до 4 К, то почти половину размера ошибки учесть все-таки стоит, что я и сделал. Корректировки почти не сказались на результатах по 38 GHz из-за сравнительно высокого NF приемника $\cong 5.5$ dB и, соответственно, высокой итоговой $T_{sys} \approx 800$ К – температуры приемной системы в апертуре антенны, но они будут полезны и нужны с прицелом на будущее.

⁵¹ Сайт и форум <http://vhfdx.ru>.

⁵² См. <http://www.vhfdx.ru/apparatura/eme-antenna-and-jupiter-noise-on-77-ghz>.

⁵³ В литературе эффективность главного лепестка чаще всего обозначается как η_B , а для КИП или aperture efficiency η_A или просто η .

⁵⁴ А все остальное, что вне главного лепестка, включено в T_{spill} .

На 24 GHz рассчитываю на меньший NF приемника, в пределах 1.5-2 dB, и более низкий T_{sys} : тут корректировки повлияют на результаты обработки данных заметнее. Также исправлена формула для земли (A1): в ней тоже по смыслу заложена температура холодного неба, которое видно главным лепестком антенны.

Из дополнений – это фотографии Солнца в период, когда был всплеск активности в 20-х числа октября 2014⁵⁵, см. Рис. 16. SFI в это время поднимался выше 200, и мне, похоже, повезло, что я этот всплеск застал со своими измерениями. Можно обратить внимание на приличную по размерам октябрьскую группу пятен на поверхности фотосферы, а также на картинке возмущений магнитного поля⁵⁶. Также там есть фото Солнца в линии HeII 304Å, это жесткий ультрафиолет. Для сравнения такие же картинки, но в более спокойный период – это 19-20 сентября 2014⁵⁷, см. Рис. 17, SFI был в это время немного более 100.

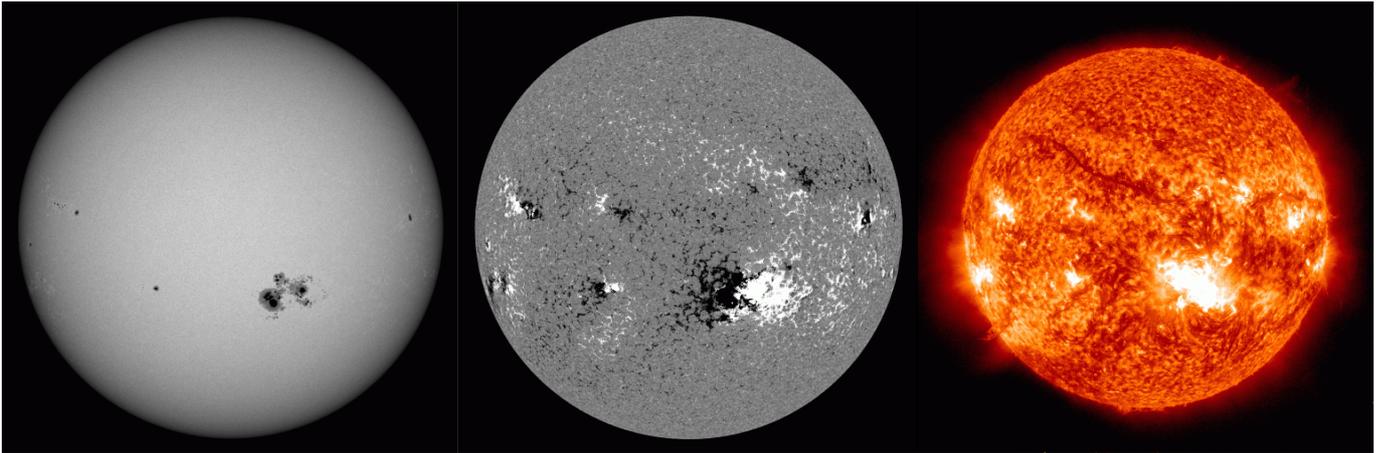


Рис. 16. Фотосфера Солнца (слева) с видимыми крупными пятнами, изображения возмущений магнитного поля (в середине) и фотография Солнца в линии HeII 304Å (справа), 24.10.2014⁵⁵. Для изображения магнитного поля: серый цвет – отсутствие магнитного поля, белый и черный – магнитное поле с разными направлениями силовых линий.

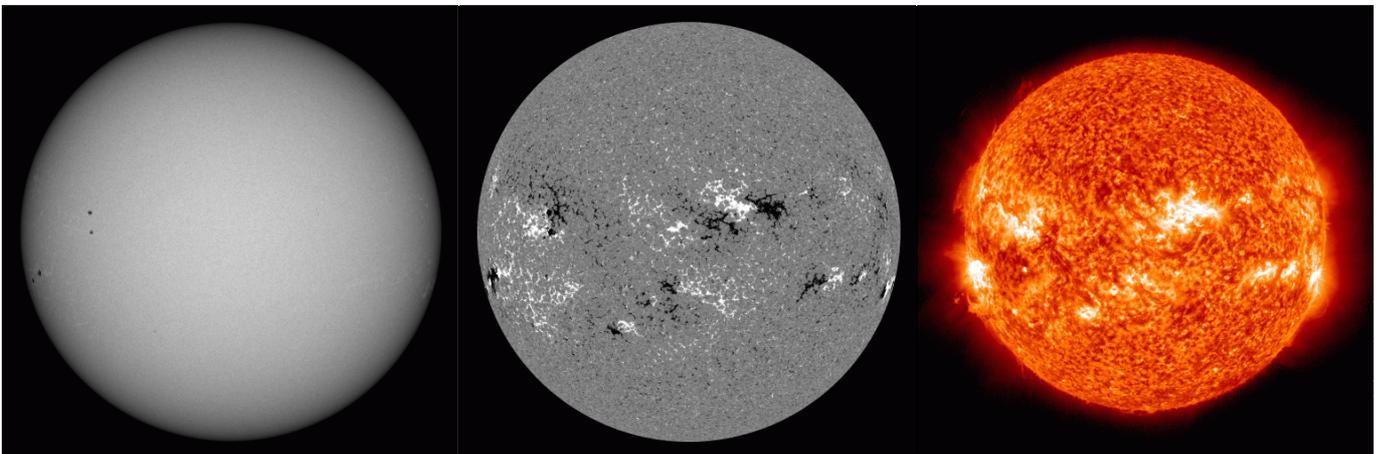


Рис. 17. Те же изображения Солнца, что и на Рис. 16, но в более спокойный период в сентябре 2014⁵⁷.

Также нашел работы Саломоновича с сотрудниками об измерениях радиоизлучения и температуры Солнца на 8 mm. Они видели зависимость между температурой Солнца и параметром активности, за который считали суммарную площадь ΣS_p солнечных пятен на поверхности⁵⁸. Более слабую, чем в сантиметровом диапазоне, но видели. Площадь пятен в качестве параметра активности удобна тем, что можно точно сказать, какое значение ΣS_p соответствует состоянию «спокойного Солнца», и куда надо экстраполировать температуру,

⁵⁵ См. http://www.tesis.lebedev.ru/sun_pictures.html?m=10&d=24&y=2014.

⁵⁶ Такие фотографии магнитного поля делаются специальными камерами-спектрографами, фиксирующими расщепление линий оптического излучения атомов в магнитном поле, благодаря т.н. эффектам Зеемана или Пашена-Бака.

⁵⁷ http://www.tesis.lebedev.ru/sun_pictures.html?m=9&d=19&y=2014.

⁵⁸ А.Е. Саломонович, В.Н. Кощенко, Р.И. Носкова, Об интенсивности радиоизлучения в 8 мм диапазоне волн, Солнечные данные, № 9, 1959, стр. 83.

чтобы найти T_{quiet} по результатам измерений, которые обычно происходят уже с добавкой шума от солнечной активности: это $\Sigma S_p \rightarrow 0$. В отличие от SFI, который, в принципе, ненулевой и для «спокойного Солнца». Измерения они проводили на радиометре с 2-метровой антенной, позже радиоизлучение пятен на 8 mm было исследовано более детально⁵⁹, используя 22-метровый радиотелескоп ФИАН с лепестком шириной 2'x2'. Их результат по «спокойному Солнцу» $T_{quiet} = 6400 \pm 800 \text{ K}$ ⁶⁰, с более поздним уточнением $7500 \pm 900 \text{ K}$ ⁵⁹.

Также сделал файлы с калькуляторами видимой температуры Луны и земли по измеренным Y-факторам в сравнении с холодным небом⁶¹. В нем использованы формулы (22) и (A1), исполнение калькулятора – в виде файла Excel. Расчет учитывает поглощение в атмосфере и ее шум, этот расчет сделан на отдельном листе, где вводятся данные по погоде и положению (элевации) антенны, в котором фиксируется шум холодного неба. К Луне также есть вычисления ожидаемой температуры по (19) с указанием неопределенности, т.е. та цифра температуры, которая должна быть видна, если параметры приемника и антенны близки к действительным. Цифры по температуре Луны относятся к ее центру, учитывается распределение температур, что есть на диске в районе полнолуния. Поэтому калькулятор лучше использовать для близких к полнолунию фаз, или на немного убывающей Луне сразу после, когда температура ее побольше, а Y-фактор выше. Отсчет фазы Луны можно изменить: бывает, что за 0 градусов фазы считают как полнолуние, так и новолуние⁶². Соответственно, можно поставить для полнолуния 0 или 180 градусов, и вводить ту цифру, что дает источник данных по фазе Луны.

Данные для расчета вводятся в клетки с синей рамкой, остальные клетки защищены (и защита автоматически включается макросом при открытии файла), но ее можно снять, пароля на защиту нет: может понадобится подкорректировать какие-то цифры, например, k – коэффициент между эффективностью главного лепестка и КИП (aperture efficiency) в формуле (10). Результаты выведены внутри большой зеленой рамки. Для ожидаемой шумовой температуры земли ориентир – температура за окном, но реальная цифра может быть и меньше. Насколько, зависит от того, куда упирается антенна при измерении шума земли. В моем случае, когда антенна упирается в соседние дома, я оцениваю разницу между принимаемой температурой и показаниями уличного термометра в несколько десятков градусов.

⁵⁹ Саломонович А.Е. *Астрономический журнал АН СССР*, т. 39, 1962, стр. 260.

⁶⁰ См. результат по T_{quiet} у Саломонович et al., 1958⁵⁸. Его использовал на 8 mm в качестве опорного для пересчета и Jeffrey Linsky³³.

⁶¹ Скачать можно тут: http://qsl.net/ua3avr/papers/Moon-Ground_Cal_2015+rus.zip.

⁶² Отсчет фазы, когда 180 градусов – полнолуние, использует, например VK3UM в EME Planner, <http://www.vk3um.com/eme%20planner.html>.