

## АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ НА ИРКУТСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙНИЯ

А.Г. Сетов, В.П. Лебедев, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
setov@iszf.irk.ru

## ABSOLUTE POWER MEASUREMENTS AT THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR

A.G. Setov, V.P. Lebedev, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** Длинные ряды данных, полученные на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР), используются для исследования ионосферы, наблюдения за космическими объектами и для пассивных радионаблюдений. Ранее для анализа этих данных применялись методы, в которых не требуется знания о точной величине принятого сигнала. В работе рассмотрена методика калибровки зарегистрированных сигналов и сравнение полученной абсолютной мощности с мощностью сигнала некогерентного рассеяния.

**Ключевые слова:** ионосфера, Иркутский радар некогерентного рассеяния, калибровка радаров.

**Abstract.** Long rows of data, obtained at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR), are used for ionospheric studies, space surveillance and passive radio observations. Methods, that do not require knowledge about exact value of received signal, were used earlier of analysis of this data. This work describes calibration technique for registered signals and comparison between measured absolute power and incoherent scatter power.

**Keywords:** ionosphere, Irkutsk Incoherent Scatter Radar, radar calibration.

---

### Введение

Радары некогерентного рассеяния (НР) — это инструменты для исследования ионосферы, обладающие антеннами с коэффициентами усиления более 30 дБ и излучающие импульсы с мощностью порядка мегаватт. Они позволяют изучать высотную зависимость электронной концентрации, температуры заряженных частиц, скорости дрейфа и других характеристик плазмы в ионосфере. Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) представляет собой рупорную двухканальную антенну 246×12 м с импульсной мощностью до 3 МВт и шириной диаграммы направленности  $0.5 \times 10^\circ$ , работающую на частотах 154–162 МГц [Жеребцов, 2002, Медведев, 2014]. С начала 2000-х на ИРНР проводятся периодические измерения ионосферных параметров, а также наблюдения за космическими объектами и пассивные радиоастрономические наблюдения. Важной особенностью ИРНР является наличие в антенне поляризационного фильтра, пропускающего только волны с горизонтальной поляризацией. При распространении волны в ионосферной плазме, плоскость её поляризации поворачивается из-за эффекта Фарадея, поэтому в принимаемом сигнале, рассеянном от ионосферы, наблюдаются характерные замирания. Форма этих замираний зависит от электронной концентрации и длины импульса радара. Таким образом, профиль концентрации можно получить с помощью обращения свертки с импульсом [Shrynev, 2004], либо более стабильным методом — многопараметрической подгонкой модели ионосферы под наблюдаемую мощность [Алсаткин и др., 2015]. Этот способ определения концентрации

не требует точного знания значения принятой мощности, но с его помощью можно вычислить мощность, принимаемую радаром исключительно от некогерентного рассеяния. Определив точное значение принятой мощности, и сравнив его с мощностью НР, можно найти дополнительные источники рассеяния или поглощения. Для того чтобы найти принятую мощность, радар необходимо откалибровать.

### Калибровка радара

Во время калибровки, зарегистрированная мощность сравнивается с мощностью от известного источника, в качестве которого может выступать генератор шума, мощный радиисточник или сигнал, отраженный от объектов с известной эффективной площадью рассеяния — спутников, Луны [Лебедев, 2015]. Поскольку характеристики приемного тракта ИРНР могут меняться со временем, а калибровку необходимо осуществить для проведенных измерений, наиболее удобным и эффективным методом является калибровка по шумовой карте неба [Renkwitz, 2014]. В этом случае, яркостная температура неба  $T_y$  умножается на диаграмму направленности радара  $F_r^2$ , и мощность шума от внешних источников имеет вид:

$$P_n = \eta_r \frac{kBD}{4\pi} \iint_{\Omega} F_r^2(\theta, \varphi) T_y(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где  $D$  — КНД антенны,  $B$  — ширина полоса приемника,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\eta_r$  — потери в приемном тракте.

Шумовые карты неба получают по результатам радионаблюдений, проводимых на определен-

ной частоте. Для того чтобы получить шум на произвольной частоте, данные разных наблюдений интерполируют, в простейшем случае используя степенную зависимость  $T(f) = T(f_0)(f/f_0)^\beta$ , где  $\beta$  — спектральный индекс. В данной работе для получения шумовой карты применяется модель GSM [de Oliveira-Costa et al, 2008], где используется более сложный метод интерполяции, основанный на методе главных компонент.

В отсутствии полезного сигнала принятая мощность, зарегистрированная в базе данных, определяется соотношением:

$$P_r = (\eta_r P_n + P_{ш.пр})g = kP_n + b, \quad (2)$$

где  $P_n$  — мощность шума неба,  $P_{ш.пр}$  — мощность собственного шума приемника,  $g$  — усиление в приемном тракте. Используя смоделированный шум неба  $P_n$ , можно получить коэффициенты регрессии  $k = \eta_r g$  (усиление) и  $b = P_{ш.пр} g$  (смещение). На рис. 1 построена регрессия для дня наблюдений, а также сравнение модельного шума неба  $P_n$  и наблюдаемого шума  $(P_r - b)/k$ .

### Абсолютные измерения мощности

Радар ИРНР работает в двухимпульсном режиме: в одном такте излучения передаются длинный прямоугольный импульс с длительностью 700/900 мкс и короткий фазоманипулированный импульс с длительностью 200 мкс. Таким образом, возможна одновременная обработка с высоким спектральным разрешением и с высоким разрешением по высоте

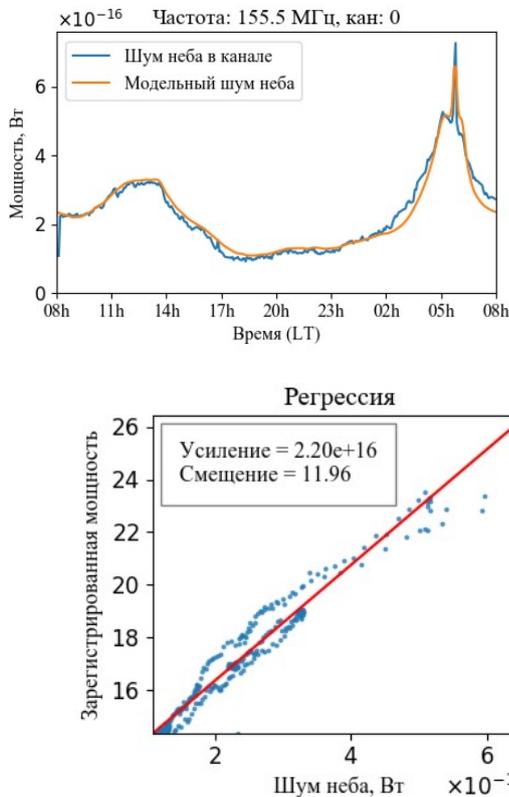


Рис. 1. Сравнение модельного и измеренного шума неба (вверху); регрессия модельного шума неба и зарегистрированной мощности

соответственно. Сигнал от длинного импульса используется для получения температур электронов и ионов, а также скорости дрейфа плазмы. Сигнал от короткого импульса позволяет определить электронную концентрацию с помощью многопараметрической подгонки модельного слоя Чепмена под форму принятого профиля мощности [Алсаткин и др., 2015].

При известном усилении и смещении в канале можно получить абсолютное значение принятой мощности в Ваттах. С другой стороны, если известна электронная концентрация  $N_e$  и температуры заряженных частиц  $T_e$  и  $T_i$  ионосферной плазмы, можно определить мощность НР сигнала, ожидаемого на входе приемника:

$$P_{НР}(t) = \frac{\eta_r \eta_t P_t \lambda^2 \sigma_e}{64\pi^3} \times \int_0^\infty \frac{N_e(r) \cos^2(\chi(r)) |a(t - 2r/c)|^2}{1 + T_e(r)/T_i(r)} \times \frac{dr}{r^2} \iint_{\Omega} F_t^2(\theta, \varphi) F_r^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (3)$$

где  $P_t$  — пиковая мощность излучения,  $a$  — огибающая излученного импульса,  $\sigma_e$  — томсоновское сечение рассеяния,  $\chi$  — угол поворота плоскости поляризации,  $F^2(\theta, \varphi)$  — диаграмма направленности антенны на передаче и приеме,  $\eta_r, \eta_t$  — потери мощности на приеме и излучении. Ранее были определены потери мощности при передаче  $\eta_t = 0.7$  [Лебедев, 2003].

На рис. 2 показаны откалиброванная принятая мощность  $P_r$  (Вт), мощность НР сигнала  $P_{НР}$  (Вт), посчитанная по формуле (3), отношение этих мощностей  $P_r/P_{НР}$  и среднее этого отношения, взятого на высотах от 300 до 450 км. Представлено 5 дней непрерывных наблюдений с 11.06.2015 по 15.06.2015. На графиках  $P_r$  и  $P_{НР}$  видна особенность приема радара ИРНР — фарадеевские замирания из-за наличия поляризационного фильтра, смазанные длинным импульсом длительностью 700 мкс. График мощности НР сигнала негладкий по времени, так как восстановление концентрации производится для отдельных временных отметок. На графике отношения  $P_r/P_{НР}$  можно заметить небольшую рябь — остатки фарадеевских горбов. Усреднение отношения мощностей (график 4) производится до высот 450 км, поскольку метод восстановления электронной концентрации иногда не учитывает последний пик фарадеевских замираний из-за низкого отношения сигнал/шум на высотах от 450 км. Светло-голубым цветом на графике 4 отмечен разброс отношения по уровню 3 сигма. В идеальном случае, когда других источников рассеяния или поглощения, помимо некогерентного рассеяния, не наблюдается, на графике 4 должна быть ровная линия на уровне 1. В действительности же видно наличие отклонения примерно в 2 раза, слишком значительного и постоянного, чтобы отнести его к физическим эффектам. Таким образом, имеют место неучтенные потери в передаточном канале.

Среднее отношения  $P_r/P_{НР}$  для более переменной ионосферы, апреля 2016, показано на рис. 3.

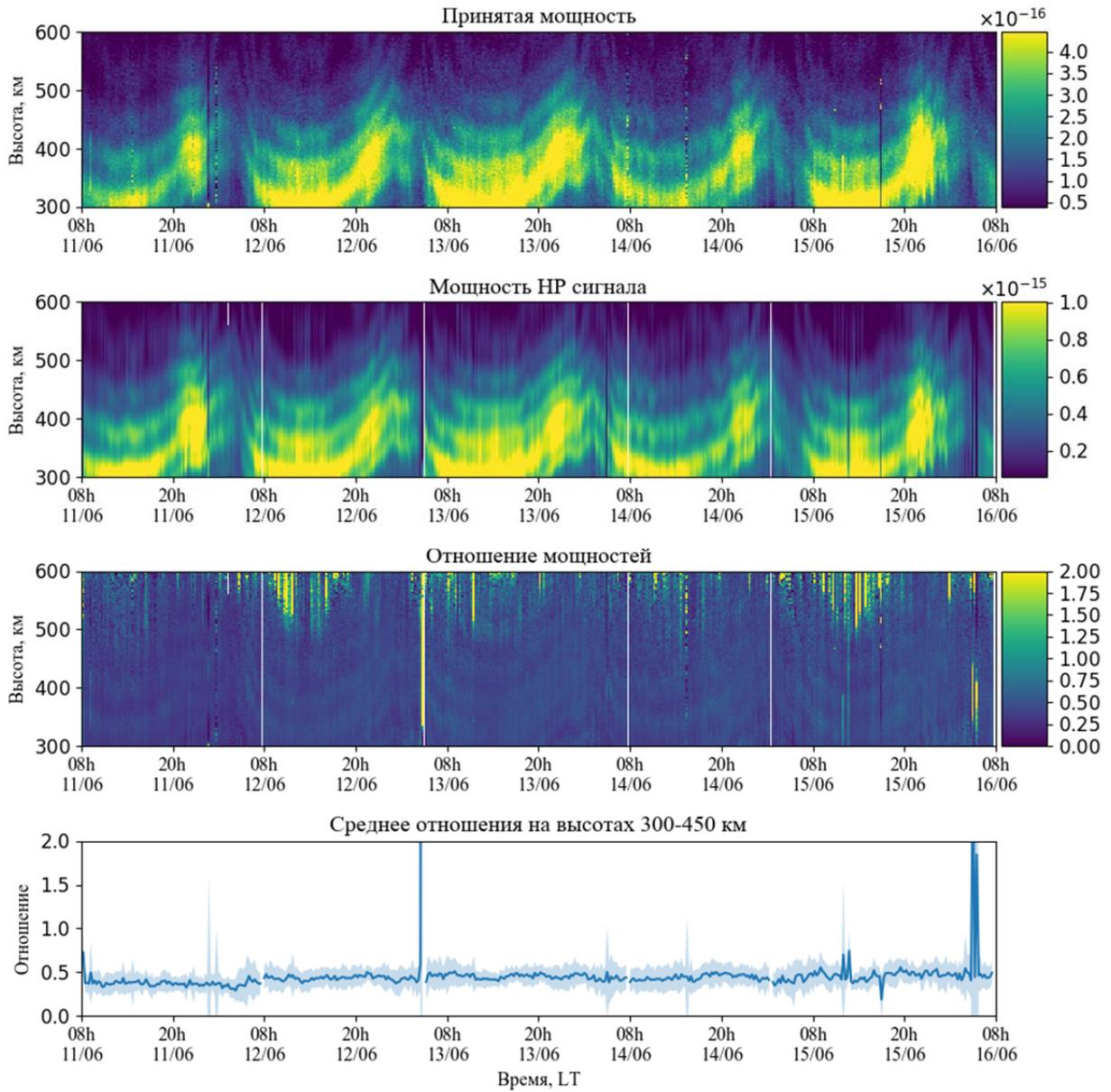


Рис. 2. Сравнение наблюдаемой мощности и мощности некогерентного рассеяния с 11.06.2015 по 15.06.2015 г.



Рис.3. Среднее отношения мощностей с 11.04.2016 по 15.04.2016 г.

Резкие шумные пики в ночное время обусловлены низкой концентрацией и, соответственно, недостаточным значением сигнал/шум для корректного восстановления параметров плазмы. Тем не менее, на рисунке также прослеживается наличие смещения, а также видно повышение отношения мощностей в вечернее время.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности поведения ионосферы вблизи максимума ионизации по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния для низкой и умеренной солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3. С. 28–36.

Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339–1345.

Лебедев В.П. Изучение тонкой структуры радиолокационного сигнала отраженного от Луны на Иркутском радаре НР // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике (БШФФ-2003): Труды VI сессии молодых ученых. Иркутск, 2003. С.117–119.

Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов: дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Иркутск, 2015. 118 с.

Медведев А.В. Развитие методов и аппаратных средств радиофизических исследований верхней атмосферы Земли на Иркутском радаре некогерентного рассеяния: дис. д.ф.-м.н. Иркутск, 2014. 225 с.

de Oliveira-Costa A., Tegmark M., Gaensler B.M., et al. A model of diffuse Galactic radio emission from 10 MHz to 100 GHz // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2008. V. 388. P. 247–260.

Renkowitz T. Evaluation and validation of a novel MST-Radar for studying atmospheric 3D structures: Ph.D. Thesis. 2014. 168 p.

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // Radio Sci. 2004. V. 39. RS3001. DOI: 10.1029/2001RS002523.