

РАДИОЛОКАЦИЯ ПЛАНЕТЫ МЕРКУРИЙ

*В. А. Котельников, Г. Я. Гуськов, В. М. Дубровин, Б. А. Дубинский,
М. Д. Кислик, Е. Б. Коренберг, В. П. Минашин, В. А. Морозов,
Н. И. Никитский, Г. М. Петров,
Г. А. Подопригора, О. Н. Ржига, А. В. Францессон, А. М. Шаховской*

Доклады Академии наук СССР, 1962. Том 147, № 6

В июне 1962 г. Институт радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций произвел радиолокацию планеты Меркурий. Для измерений было выбрано нижнее соединение Меркурия, когда он ближе всего подходит к Земле. Расстояние до Меркурия во время измерений составляло 83–88 млн км и было в два раза больше, чем при радиолокации планеты Венера в 1961 г. [1].

Изучение производилось на частоте около 700 МГц. Передающая антенна имела круговую поляризацию. Плотность потока мощности при излучении составляла 375 МВт на стерадиан. Из-за больших расстояний и малых размеров (площадь поверхности Меркурия в шесть раз меньше площади Венеры) на всю видимую поверхность Меркурия попадало всего около 1 Вт. Передача велась сеансами длительностью около 10 мин., в течение которых сигнал проходил расстояние от Земли до Меркурия и обратно. Передаваемый сигнал имел вид чередующихся телеграфных посылок на двух частотах, отличающихся на 62,5 Гц. Длительность посылок и пауз на каждой частоте составляла 1024 мсек.

Прием отраженных сигналов производился на антенну с линейной поляризацией. На входе приемника стояли парамагнитный и параметрический усилители. С выхода приемника отраженные сигналы вместе с шумами в полосе частот от 30 до 300 Гц и масштабным колебанием 2000 Гц записывались на магнитную ленту. Начало записи колебаний 2000 Гц соответствовало расчетному моменту прихода 10-минутной серии отраженных сигналов.

Смещение частоты несущей и частоты манипуляции отраженных сигналов, вызываемое эффектом Доплера из-за движения Меркурия и Земли (с учетом ее вращения), компенсировались по расчетной программе с помощью специального устройства, линейно менявшего частоту в течение сеанса ступеньками по 0,2 Гц. При этом астрономическая единица принималась равной $A = 149\,599\,300$ км [1], скорость света 299 792,5 км/сек.

Распределение энергии в спектре записанных колебаний исследовалось с помощью 20-канального анализатора, аналогичного применявшемуся при радиолокации Венеры в 1961 г. [2, 3]. В анализаторе использовались двухконтурные полосовые фильтры с шириной полосы пропускания 16 Гц (по уровню 3 дБ), средние частоты которых отличались на 16 Гц. Благодаря четырехкратному увеличению скорости магнитофона при воспроизведении по сравнению с записью (что вызывало пропорциональное расширение спектра частот записанных колебаний в 4 раза) ширина полосы пропускания каналов анализатора, пересчитанная к принимаемому сигналу, составляла 4 Гц.

Принцип измерения энергии отраженных сигналов поясняется рис. 1. На этом рисунке изображено изменение мгновенной мощности сигнала и шума $E'(t)$ и $E''(t)$ в двух каналах анализатора, частоты которых отличаются на 62,5 Гц. При воспроизведении магнитной записи на выходе каждого канала анализатора определяется суммарная энергия сигнала и шума (обозначения см. рис. 1) за четные и нечетные полупериоды частоты манипуляции длительностью $T/2 = 1024$ мсек. и вычисляется разностная энергия

$$\Delta W_\tau = \left(\sum_{1,3,5,\dots} w'_i - \sum_{2,4,\dots} w'_i \right) - \left(\sum_{1,3,5} w''_i - \sum_{2,4} w''_i \right). \quad (1)$$

Эта величина зависит от временной задержки τ , устанавливаемой при воспроизведении магнитной записи. Пусть задержка τ выбрана такой, что момент $t + \tau$ точно соответствует фактическому времени прихода серии отраженных сигналов. В этом случае сигнал попадает в одном канале в нечетные интервалы, а во втором канале, частота

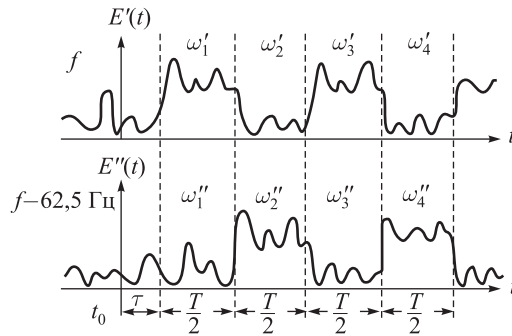


Рис. 1. Временная диаграмма работы анализатора: $E'(t)$, $E''(t)$ — мгновенная мощность принимаемого сигнала соответственно в первом и втором каналах (частоты которых отличаются на 62,5 Гц); T — период манипуляции сигналов (2048 мсек.); w'_i , w''_i — энергия сигнала и шума за интервалы длительностью $T/2$ соответственно в первом и втором каналах; t_0 — момент начала записи колебаний 2000 Гц на магнитной ленте; τ — задержка, устанавливаемая оператором при воспроизведении магнитной записи

которого на 62,5 Гц ниже, — в четные. В первом канале суммарная энергия за нечетные интервалы равна энергии сигнала и шума, а за четные интервалы — только энергии шума, во втором канале — наоборот. В этом случае величина ΔW_T максимальна и равна в среднем энергии отраженных сигналов, попадающей в оба канала. Полученные значения ΔW_T относились к большей частоте.

Калибровка чувствительности радиолокационной установки производилась по излучению внеземного дискретного источника Кассиопея А. Были обработаны материалы 53 сеансов за период с 10 по 15 VI 1962 г.

Суммарный результат измерения спектра отраженных от Меркурия сигналов представлен на рис. 2. На нем по оси абсцисс отложены значения частот настройки каналов анализатора f , по оси ординат — сумма разностных энергий (1) за обработанные сеансы, пересчитанная на плотность потока мощности S , принимаемого антенной. Пунктиром отмечена величина среднеквадратичной погрешности, вызываемой шумами.

Если астрономическая единица соответствует принятой нами величине 149 599 300 км, то при отсутствии размытия спектра энергия сигнала должна была накапливаться во все дни в каналах, соответствующих номинальной частоте сигнала 215 Гц, что, как видно из рис. 2, и получилось.

Энергия центральной полосы шириной 4 Гц на рис. 2 соответствует мощности отраженного сигнала 0,035 Вт, изотропно рассеиваемой поверхностью Меркурия. Так как на всю поверхность Меркурия в этих измерениях падало около 1 Вт, средний коэффициент отражения для этой полосы оказывается равным 3,5%. При суммировании энергий в полосе частот 12 и 20 Гц¹⁾ (соответственно 3 и 5 полос на рис. 2) коэффициент отражения Меркурия получился равным 6%. Эти результаты близки к данным, которые известны нам о Луне. По радиолокационным измерениям [4, 5] коэффициент отражения Луны составляет 2 ÷ 7,5%, а половина энергии отраженных сигналов сосредоточена в полосе частот шириной около 2 Гц (в пересчете на Меркурий) [6].

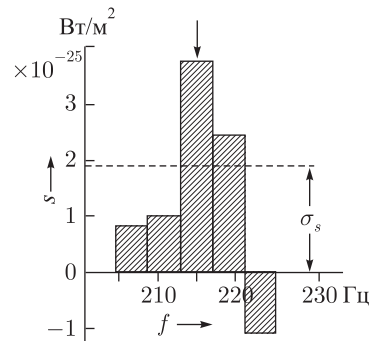


Рис. 2. Средний спектр отраженных от Меркурия сигналов (10–15 VI 1962 г.)

¹⁾ Период вращения Меркурия по оптическим наблюдениям равен 88 земным суткам, что при частоте зондирующего сигнала около 700 МГц может вызвать максимальное расширение спектра эхо-сигнала ± 10 Гц относительно средней частоты.

Поскольку надежно установить коэффициент отражения Меркурия ввиду малого отношения сигнал – шум, не представляется возможным, результаты измерения представлены на рис. 3 в виде вероятностных гистограмм. По оси абсцисс на них отложено значение коэффициента отражения ρ с интервалом в 1%, по оси ординат — вероятность p того, что истинное значение коэффициента отражения находится в данном интервале. При этом считалось, что априорное распределение плотности вероятности коэффициента отражения равномерно в пределах $0 \div 100\%$.

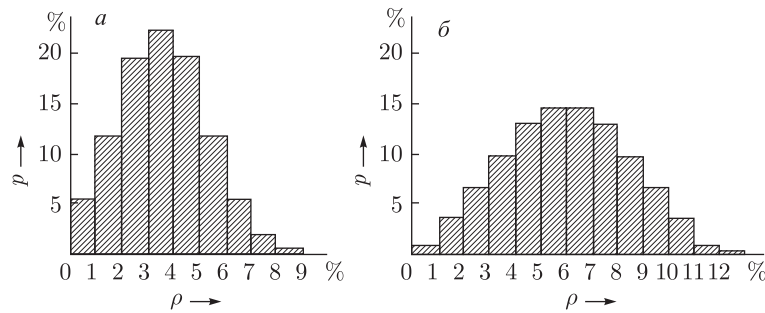


Рис. 3. Распределение вероятностей значений коэффициента отражения по энергии в полосе частот 4 Гц (а) и 12 Гц (б)

Частота приходящих отраженных сигналов и их запаздывание зависят от величины астрономической единицы A . Накапливая разностную энергию (1) по каналам анализатора, соответствующим различным значениям A , и беря соответствующие задержки τ , можно получить значение разностной энергии отраженного сигнала ΔW_τ в предположении различных значений A .

На рис. 4 представлен результат такой обработки. По оси абсцисс отложены различные значения астрономической единицы через 10 000 км, по оси ординат отношение $\sum \Delta W_\tau / \sigma_{\Delta W}$, где $\sum \Delta W_\tau$ — сумма разностных энергий за обработанные сеансы, взятая по каналам и задержкам, соответствующим данной астрономической единице; $\sigma_{\Delta W}$ — дисперсия величины $\sum \Delta W_\tau$, определенная по данным этого рисунка. Как видно из рисунка, максимальное положительное значение отношения (равное 2, 3) соответствует астрономической единице 149 600 000 км. Отрицательные выбросы на других значениях астрономической единицы вызваны шумами, так как разностная энергия (1) отраженных сигналов в отсутствие шумов всегда должна иметь положительный знак.

Ввиду малости полученного значения $\sum \Delta W_\tau / \sigma_{\Delta W}$ проведенный эксперимент по радиолокации Меркурия, взятый отдельно, не может надежно гарантировать определенное из него значение астрономической единицы. Однако он дополнительно подтверждает величи-

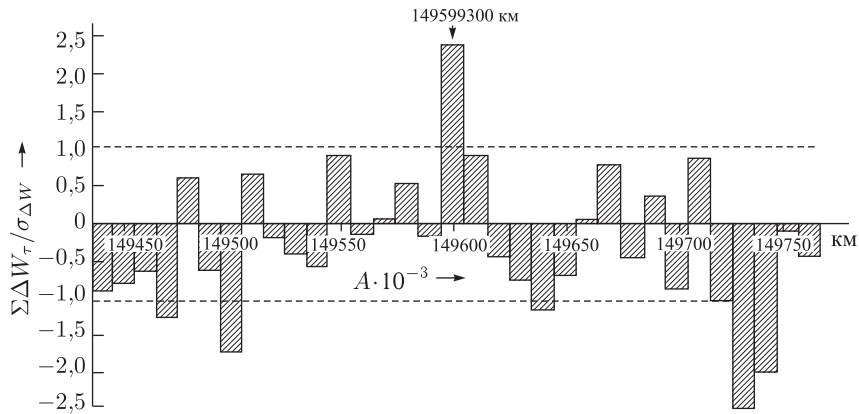


Рис. 4. Накопление разностной энергии для различных значений астрономической единицы

ну астрономической единицы, полученную при радиолокации Венеры в 1961 г. [1, 7–9].

Выводы. Результаты проведенных радиолокационных наблюдений планеты Меркурий не противоречат результатам измерений астрономической единицы, полученным при радиолокации Венеры в 1961 г., и дают коэффициент отражения Меркурия, близкий к коэффициенту отражения лунной поверхности.

Институт радиотехники
и электроники Академии наук СССР

Поступило 11 X 1962

Цитированная литература

1. В. А. Котельников, В. М. Дубровин и др., ДАН, 145, № 5 (1962).
2. В. А. Котельников, Л. В. Апраксин и др., Радиотехника и электроника, 7, № 11 (1962).
3. В. А. Морозов, З. Г. Трунова, Радиотехника и электроника, 7, № 11 (1962).
4. S. J. Fricker, R. P. Ingalls et al., J. Res. Nat. Bur. Stand., 64 D, № 5, 455 (1960).
5. W. K. Victor, R. Stevens, Science, 134, № 3471, 46, (1961).
6. Луна, Сборн. под ред. А. В. Маркова, М., 1960.
7. J. H. Thomson, G. N. Taylor et al., Nature, № 4775, 519 (1961).
8. The Staff, Millstone Radar Observatory, Nature, № 4776, 592 (1961).
9. L. R. Malling, S. W. Golomb, J. Brit. I. R. E., 22, № 4, 297 (1961).