

УДК 523.164.75

## ОПЫТ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ СОЛНЦА С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА «ВЕНЕРА-16»

*А. Г. Павельев, О. И. Яковлев, А. И. Кучерявенков, С. Н. Рубцов,  
Р. А. Андреев, А. Г. Мелихов*

Описан опыт бистатической радиолокации солнечной короны, осуществленный в дециметровом диапазоне с помощью аппарата «Венера-16». Анализируются мощность, спектр и изменение частоты отраженного сигнала. Оценивается скорость движения отражающей области плазмы. Показана возможность бистатической радиолокации Солнца.

1. Радиофизические исследования Солнца и околосолнечной плазмы ведутся как радиоастрономическими, так и активными методами. Систематизированное изложение теоретических основ и результатов радиоастрономических наблюдений приведено в монографии [1]. К активным методам относится радиопросвечивание околосолнечной плазмы с применением космических аппаратов. Теория и основные результаты, полученные с помощью этого метода, обобщены в [2]. Для исследования Солнца применяется также радиолокационный метод. Моностатическая радиолокация Солнца с Земли выполнялась в метровом диапазоне [3], а попытки обнаружить отражение от Солнца в дециметровом диапазоне завершились неудачно [4]. Причина неудач связана с глубоким проникновением в плазму дециметровых волн и более сильным их поглощением по сравнению с метровыми волнами.

В работе [5] предложен новый метод исследования — бистатическая радиолокация Солнца. В этой публикации теоретически показано, что возможно обнаружение отраженных солнцем радиоволн в дециметровом диапазоне при выполнении определенных условий, связывающих длину волны и положение космического аппарата. Ранее бистатическая локация применялась для исследования поверхностей Луны и Венеры [2]. При бистатической локации радиоволны от космического аппарата до наземного приемного пункта распространяются по двум траекториям: по прямой и по траектории отраженного от планеты луча. Особенность бистатической локации Солнца состоит в том, что направление траектории отраженной волны меняется плавно из-за рефракции в плазме. В отличие от случая моностатической локации с Земли минимальное расстояние отраженной волны от центра Солнца при бистатической радиолокации существенно больше. Поэтому поглощение меньше, что повышает вероятность обнаружения отраженного сигнала. Траектории распространения и направления прихода прямого и отраженного сигналов на приемную антенну различаются, и это создает возможность их селекции по частоте. Влияние флуктуаций электронной концентрации околосолнечной плазмы должно приводить к уширению энергетического спектра радиоволн и затруднять частотную селекцию прямого и отраженного сигналов. Теоретический анализ, выполненный нами в [5], показал, что обнаружение отраженного от Солнца радиосигнала в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн возможно с применением метода бистатической радиолокации.

Цель данной работы заключается в доказательстве возможности бистатической радиолокации Солнца и анализе результатов первого

эксперимента по бистатической локации, осуществленного с помощью аппарата «Венера-16».

2. Эксперименты по бистатической радиолокации Солнца проводились нами с 6 по 23 июня 1984 г. с использованием космического аппарата «Венера-16», было выполнено шесть сеансов бистатической радиолокации. Схема экспериментов показана на рис. 1, где  $O$  — центр Солнца,  $T$  — космический аппарат,  $B$  — приемный пункт на Земле. Космический аппарат имеет координаты  $R_T$ ,  $\theta$  в гелиоцентрической системе координат с полярной осью  $OB$ , проходящей через центры Солнца и Земли. Расстояние  $OB$ , равное одной астрономической единице, обозначено буквой  $a$ , радиус Солнца —  $R_0$ . Прямой и отраженный лучи показаны соответственно цифрами 1 и 2, они характеризуются прицельными расстояниями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Ось  $r$  показывает направление радиальной составляющей скорости движения окосолнечной плазмы  $V$ . Угол отражения луча 2 обозначен  $\varphi$ , а угол элонгации для прямого луча 1 обозначен  $\psi$ .

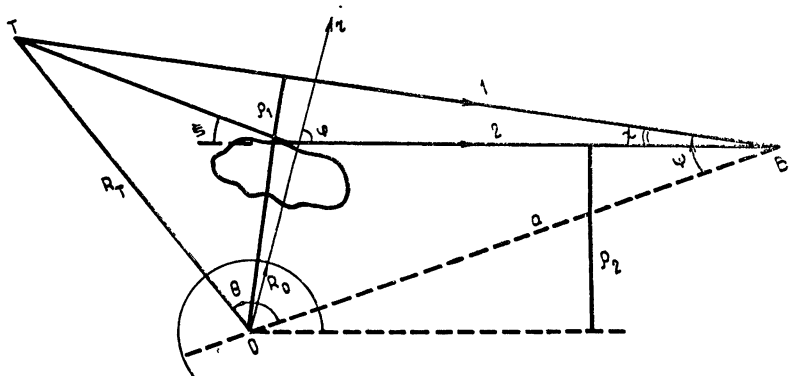


Рис. 1. Схема эксперимента бистатической радиолокации Солнца.

Передатчик космического аппарата излучал радиоволны  $\lambda = 32$  см с помощью антенны, направленной на Землю. Прием на Земле осуществлялся на антенну с высоким коэффициентом усиления и шириной диаграммы направленности около 20 угловых минут по уровню половинной мощности. Принятый сигнал гетеродинировался, его частота понижалась до 19,7 кГц, после чего сигнал регистрировался в полосе частот 64 кГц в аналоговом виде на магнитную ленту. Синхронно регистрировался опорный сигнал от стабильного кварцевого генератора.

При обработке производилось преобразование аналоговой информации в цифровой вид. Затем осуществлялся спектральный анализ с помощью специализированного быстродействующего фурье-процессора. Для обработки был создан комплекс программ, позволяющий менять полосу анализа и ее положение в частотной области с помощью цифрового гетеродинирования. Оптимальным был признан режим, дававший спектральные отсчеты в 512 равноотстоящих точках в полосе  $16 \div 48$  кГц. С целью более полного анализа экспериментальных данных использовалось быстрое преобразование Фурье с коэффициентом перекрытия, равным четырем. Суть применения быстрого преобразования Фурье с перекрытием состоит в том, что последовательно вычислялись спектры по цифровым массивам, сдвинутым друг относительно друга на одну четверть их длины. Для уменьшения флуктуаций шума применялось усреднение спектров за время  $\sim 1$  с. Разрешение по частоте составило 62,5 Гц.

Наиболее мощный отраженный сигнал был зарегистрирован 19 июня 1984 г., когда угловое расстояние  $\psi$  между Солнцем и спутником «Венера-16» составило 60 угловых минут, что соответствует при-

цельному расстоянию  $\rho_1 = 4R_0$ . На рис. 2, для примера, показана эволюция энергетического спектра по данным, полученным 19 июня 1984 г. в интервале от 15ч 23 мин до 15ч 25 мин по московскому времени.

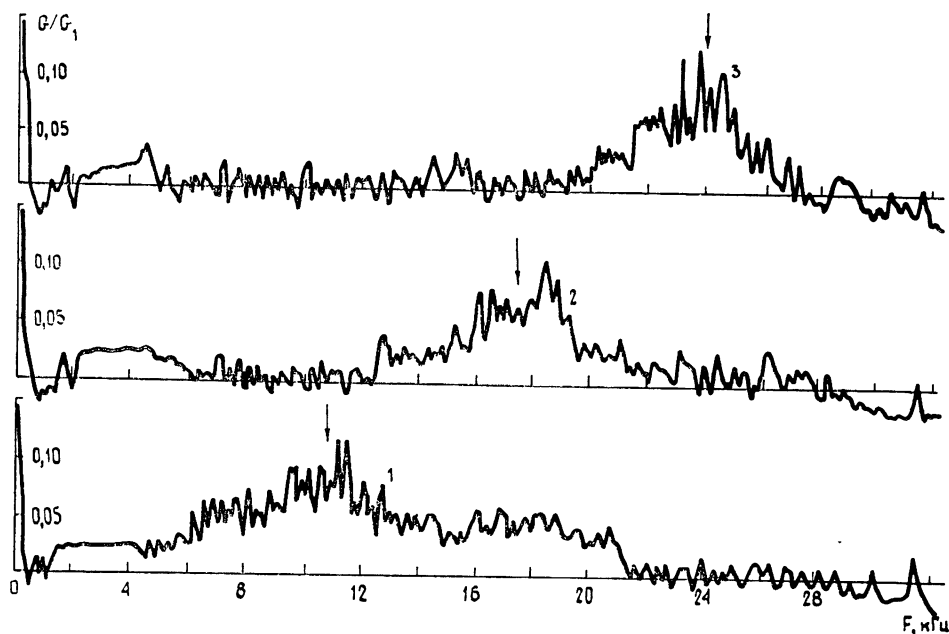


Рис. 2. Энергетический спектр прямой и отраженной радиоволн.

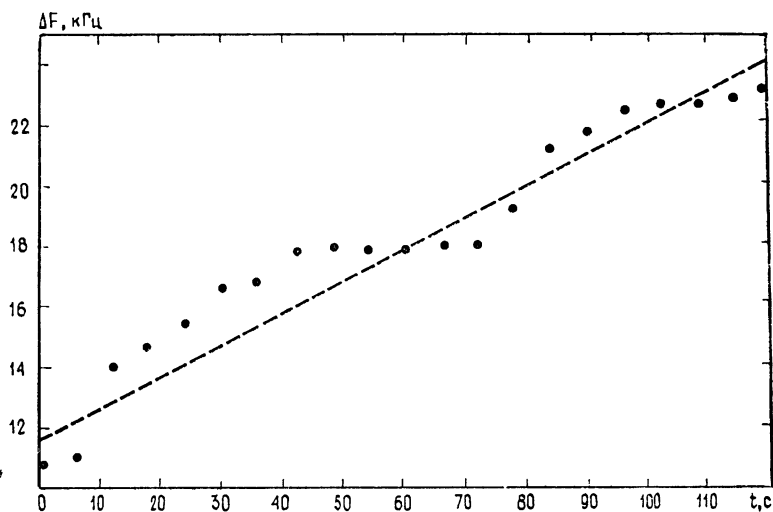


Рис. 3. Зависимость разности частот  $\Delta F$  прямого и отраженного сигналов от времени.

По вертикальной оси на спектрограммах рис. 2 отложены значения спектральной мощности  $G$ , нормированной на мощность прямого сигнала  $G_1$ ; по горизонтальной оси — частота в килогерцах, причем начало оси совмещено с частотой прямого сигнала. Всего было проанализировано около 600 спектров, на рис. 2 показаны спектрограммы, обозначенные цифрами 1—3, которые были получены через 60-секундные интервалы времени. Сравнительно узкий пик слева соответствует прямому сигналу. Спектр его размыт вследствие рассеяния радиоволн на движущихся неоднородностях околосолнечной плазмы [2]. На рис. 2 показан также отраженный сигнал, имеющий значительно более широкий спектр, который смещается со временем в сторону высоких частот; центр спектра этого сигнала отмечен стрелкой. Форма спектра отра-

женного сигнала изменяется нерегулярно, смещение «центра» сигнала неравномерно. Сначала спектр широкополосного сигнала отстоял от прямого на 11 кГц (нижняя спектрограмма 1 на рис. 2), за 120 секунд «центр» сигнала сместился на 13 кГц, так что разность частот прямой и отраженной волн  $\Delta F$  составила 24 кГц. На рис. 3 дана зависимость разности частот прямого и отраженного сигналов  $\Delta F$  от времени. Как следует из пунктирной прямой рис. 3, отраженный, сигнал смещался по частоте со средней скоростью 120 Гц/с. Зависимость ширины спектра отраженного сигнала  $\Delta f$  по уровню половинной мощности показана на рис. 4; видно, что ширина спектра отраженного сигнала уменьшалась от 13 до 4 кГц. Отношение мощностей в максимумах спектров отраженного и прямого сигналов составляло около  $-10$  дБ. Отношение полных мощностей отраженного и прямого сигналов имело значение  $\sim 2$  дБ, что примерно на 20—30 дБ больше, чем обычно бывает при бистатической радиолокации планет земной группы. Аналогичный аномально высокий уровень отраженного от Солнца сигнала при локации с Земли в метровом диапазоне волн описан в [3]. Эффективная поверхность рассеяния в эксперименте [3] достигала нескольких сотен солнечных дисков. В качестве возможной причины такого явления рассматривалось взаимодействие зондирующего радионизлучения с плазменными волнами [6, 7]. Подробный анализ механизма отражения в нашем эксперименте будет проведен в другой работе. В данной статье кратко укажем на возможные причины рассеяния сигнала.

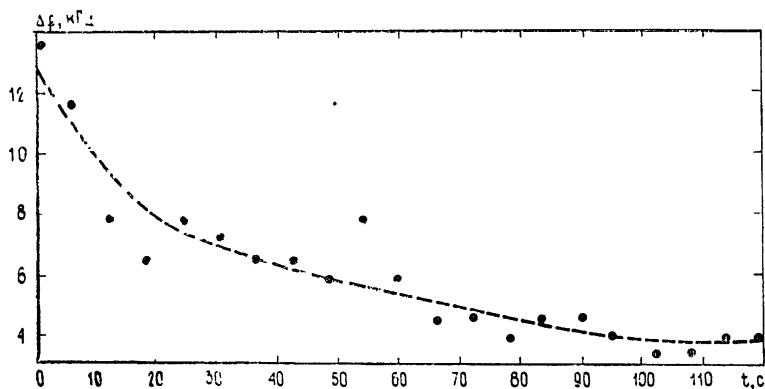


Рис. 4. Зависимость ширины спектра отраженной радиоволны  $\Delta f$  от времени.

3. Рассмотрим модель, основанную на предположении сферически-симметричного распределения средней электронной концентрации в короне. Согласно [5] лучевая траектория отраженного луча определяется углом рефракции  $\xi(\rho)$ , а прицельное расстояние  $\rho$  отраженного луча связано с прицельным параметром прямого луча. В работе [5] вычислены зависимости  $\xi(\rho)$  для разных диапазонов волн, но на рис. 2 работы [5] допущена опечатка: подписи на вертикальной оси следует читать  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ . В [5] показано, что для условий проведенного нами эксперимента, когда прицельное расстояние прямого луча равнялось  $\rho_1 = 4R_0$ , отраженный луч должен иметь прицельное расстояние  $\rho_2 \approx 1,01R_0$ . Угол  $\chi$  между лучевыми линиями прямого и отраженного сигналов в точке приема (рис. 1) должен равняться в этом случае 30—40 угловым минутам, что примерно в три-четыре раза больше полуширины главного лепестка диаграммы направленности наземной приемной антенны. Это означает, что в рамках модели сферически-симметричной короны, принятой для расчетов в [5], прием на нашу антенну одновременно прямого сигнала и сигнала, отраженного из-за регулярного градиента электронной концентрации, маловероятен. При этом не исключается возможность возрастания уровня отраженного сигнала вследствие эффекта рефракционного усиления вблизи зоны каустики [5]. Граница каустики, существенно зависящая от фактического распреде-

ления электронной концентрации в солнечной короне, могла попасть в пределы главного максимума диаграммы направленности приемной антенны.

Отражение радиоволн возможно от фронта ударной волны, характеризующейся перемещающимся в окосолнечном пространстве скачком плотности. В этом случае частота радиосигнала, отразившегося от области скачка коэффициента преломления, приобретает доплеровский сдвиг, связанный с перемещением фронта. Исходя из наших экспериментальных данных о зависимости частотного сдвига  $\Delta F(t)$  (рис. 3), можно оценить радиальную составляющую скорости движения  $V$  отражающей области. Поскольку  $\Delta F(t)$  положительна и увеличивается со временем, то отражающий фронт должен иметь радиальную составляющую скорости движения, направленную от центра Солнца. Продифференцировав по времени разность фаз отраженной и прямой волн, получаем выражение для  $\Delta F$ , которое определяется проекцией скорости неоднородности на направление отраженного луча  $V \cdot \sin \chi$ . Таким образом, радиальная составляющая скорости движения отражающего фронта выражается через разность частот  $\Delta F: V = \Delta F \lambda / 2 \sin \chi$ , где  $\lambda$  — длина волны, излучаемой с борта космического аппарата. При разности частот  $\Delta F \approx 12$  кГц, которая отмечалась в начале сеанса (рис. 3), получаем, что  $V = (650 \pm 50)$  км/с. В конце сеанса  $\Delta F \approx 23$  кГц, что соответствует величине  $V = (1200 \pm 50)$  км/с. Таким образом скорость движения неоднородности за время  $t = 120$  с возросла на  $(550 \pm 50)$  км/с, т. е. среднее ускорение составило  $(4,6 \pm 0,1)$  км/с<sup>2</sup>. За время наблюдения отражающая область сместилась от Солнца на расстояние около  $10^5$  км или  $0,15R_0$ .

Зависимость ширины  $\Delta f(t)$  спектра отраженного сигнала от времени указывает на изменение разброса скоростей плазмы в пределах рассеивающей области. Из экспериментальной зависимости  $\Delta f(t)$  (рис. 4) следует, что разброс скоростей составляет несколько сотен километров в секунду, а в ходе сеанса уменьшается до  $150$ — $200$  км/с. Причиной такого поведения спектра отраженного сигнала может быть рассеяние сигнала областью повышенной турбулентности, которая возникает в плазме солнечного ветра за передним фронтом ударной волны [7].

4. Положение и характер перемещения отражающей области указывают на нестационарный процесс, который происходил в окосолнечной плазме на расстояниях  $r = (3 \div 4)R_0$  от центра Солнца. Известно, что большинство нестационарных событий в короне связано со следующими явлениями: распространяющимися ударными фронтами, струями (стримерами), компактными выбросами плазмы (транзиентами) и расширяющимися магнитными арками [1]. Скорости движения ударных фронтов согласно [1], как правило, превышают  $1000$  км/с. Существуют в короне также и волны плотности, имеющие скорость распространения  $900 \div 1400$  км/с [6]. Всплеск радиоизлучения, указывающий на место возникновения нестационарного явления, обычно регистрируется на расстояниях  $r = (1,5 \div 3,0)R_0$  от центра Солнца, а ударный фронт распространяется на дистанции  $(3 \div 4)R_0$  и более [1]. Наблюдались неоднократно нестационарные явления в виде струи, существовавшие около  $100$  с и пересекавшие корону с очень высокими скоростями. Компактные выбросы плазмы обычно со скоростью около  $300$  км/с удаляются от Солнца до расстояний порядка  $5R_0$  и дальше. Скорость расширения магнитных арок также составляет величину около  $300$  км/с [1].

Таким образом, в результате выполненных экспериментов показана возможность бистатической радиолокации Солнца. В диапазоне  $32$  см обнаружен отраженный сигнал, наиболее отчетливо отражение наблюдалось, когда прицельное расстояние прямого луча составляло около  $4R_0$ , а расстояние области отражения от центра Солнца равнялось  $(3 \div 4)R_0$ . Радиальная составляющая скорости перемещения отражающей области составляла  $650 \div 1200$  км/с. Разброс скоростей движения

плазмы в пределах области отражения равнялся  $\pm 200$  км/с. Наблюдавшаяся скорость перемещения отражающего фронта позволяет сделать вывод о том, что наиболее вероятной причиной отражения радиосигнала является корональный выброс плазмы, который может сопровождаться распространением ударных волн и образованием областей повышенной турбулентности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крюгер А Солнечная астрономия и астрофизика. — М.: Мир, 1985 — 469 с.
2. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в космосе — М.: Наука, 1985, —214 с.
3. James J V — Solar Phys., 1970, 12, № 1, p. 143
4. Fitz H. R, Benz A. O. — Astrophys. J., 1981, 250, № 2, pt. 1, p. 782.
5. Кучерявенков А И, Павельев А. Г, Рубцов С. Н, Яковлев О. И — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, 28, № 7, с. 807.
6. Wentzel D G. — Astrophys. J., 1981, 248, № 3, pt. 1, p. 1132.
7. Gordon I. M — Space Sci. Revs, 1973, 15, № 2/3, p. 157
8. Застенкер Г Н, Вайсберг О. Л, Немечек З и др — Космические исследования, 1986, 24, № 2, с. 151.
9. Jager C. — Solar Phys., 1985, 96, № 1, p. 143.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР

Поступила в редакцию  
14 мая 1986 г.

#### EXPERIMENT ON BISTATIC RADIOLOCATION OF THE SUN USING VENERA-16 SPACECRAFT

*A. G. Pavel'ev, O. I. Yakovlev, A. I. Kucheryavenkov,  
S. N. Rubtsov, R. A. Andreev, A. G. Melikhov*

The experiment on bistatic radiolocation of the Sun by decimeter waves using Venera-16 spacecraft is described. The spectrum, frequency variation and intensity of the reflected radiosignal are analysed. The reflecting region velocity is determined. The possibility of bistatic radiolocation of the Sun is proved.

---