

523.164

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ МЕРЦАНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ

Для изучения природы астрофизических объектов важно знать размеры радиоизлучающей области; очень важна также зависимость размеров источника от длины излучаемой волны λ .

Исследование угловых размеров радиоисточников и распределения их радиояркости ограничено разрешающей способностью радиотелескопов θ_0 , которая определяется шириной их диаграммы направленности:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{d}; \tag{1}$$

здесь d — база приемного устройства (размер антенны или расстояние между разнесенными антеннами). У современных радиотелескопов (таких, как, например, крестообразный радиотелескоп ФИАН) $d \sim 1$ км и на волнах метрового диапазона $\theta_0 \sim \sim 3' \div 20'$. Такая точность является недостаточной для локализации тех объектов, угловые размеры которых меньше $20'$, а также для исследования тонкой структуры протяженных радиоисточников.

В 1950 г. был предложен способ получения значительно большей разрешающей силы ¹, который основан на наблюдении дифракции космического радиоизлучения на Луне. При использовании дифракции на краю лунного диска разрешающая способность определяется расстоянием между максимумами дифракционной картины на Земле, совпадающим с размером $L = \sqrt{\lambda R}$ первой зоны Френеля, и расстоянием $R \sim 400\ 000$ км от Луны до Земли *):

$$\theta_0 = \frac{L}{R} = \sqrt{\frac{\lambda}{R}}. \tag{2}$$

При $\lambda = 3$ м $\theta_0 \sim 20''$, т. е. разрешение оказывается на порядок выше, чем у радиотелескопов. В принципе другая часть той же самой дифракционной картины, расположенная на одной прямой с источником и центром Луны **), могла бы дать разрешение $\theta_0 \sim 0,2''$, т. е. еще на два порядка выше. Однако этот последний способ практически не используется как из-за искажений дифракционной картины неровностями лунной поверхности, сравнимыми с масштабом L , так и из-за необходимости во время наблюдения иметь источник на линии центра Луны. Измерения, выполненные в последние годы во время затмения Луной радиоисточника 3С 273 ² и Крабовидной туманности ³, позволили получить интересную информацию о структуре и распределении радиояркости этих объектов.

*) Для оценки L согласно определению зоны Френеля можно воспользоваться соотношением $\sqrt{R^2 + L^2} - R \sim \lambda$. Это дает $L = \sqrt{\lambda R} \sim 30$ км при $\lambda = 3$ м.

**) В этом случае масштаб L дифракционной картины определяется соотношением

$$\sqrt{R^2 + (r+L)^2} - \sqrt{R^2 + r^2} \sim \lambda$$

($r = 1740$ км — радиус Луны). Отсюда $L \sim \frac{R\lambda}{r} \sim 350$ м при $\lambda = 3$ м.

Открытие в 1963 г. астрофизических объектов особого класса, так называемых квазизвездных источников с угловыми размерами $\leq 1''$, снова поставило вопрос о получении значительно большей разрешающей силы.

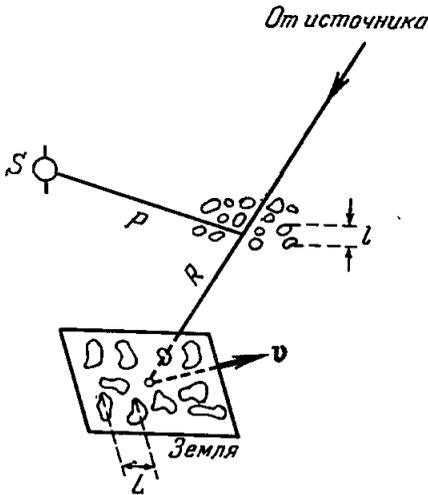
В настоящее время весьма перспективным представляется метод, основанный на наблюдениях «мерцаний» радионисточников. Идея этого метода была впервые предложена в 1956 г. в работе ⁴ и подробно рассмотрена в работе ⁵. Принцип этого метода состоит в следующем. Если между точечным источником радиоволн и Землей имеется тонкий слой, содержащий статистические неоднородности электронной плотности, проходящие через слой волны испытывают дифракцию. Полностью дифракционная картина формируется на «фокальном» расстоянии $\sim l/4 \Phi_{\text{расс}}$ от слоя неоднородностей, где $\Phi_{\text{расс}}$ — характерный угол рассеяния радиоволн на неоднородностях. В случае, когда размер неоднородностей значительно превосходит длину волны (~ 1 м), что имеет место в условиях солнечной короны, хорошо соблюдаются условия геометрической оптики, поэтому рассеивающее действие слоя неоднородностей сводится к искажению фазы волны $\Delta\psi$. Если $|\Delta\psi| \ll 1$, то масштаб дифракционной картины в плоскости наблюдения $L \sim l$, если же $|\Delta\psi| \gg 1$, то L зависит от соотношения размеров неоднородностей (l) и первой зоны Френеля ($\sqrt{\lambda R}$). При $l < \sqrt{\lambda R}$ $L \sim l |\Delta\psi|^*$, а при $l > \sqrt{\lambda R}$ эта мелкомасштабная картина оказывается наложенной на крупномасштабную, имеющую характерный размер l . Наличие последней связано с фокусирующим действием неоднородностей, имеющим место при $l \gg \sqrt{\lambda R}$ (см. ⁵).

Все сказанное выше относилось к точечному источнику. С увеличением угловых размеров источника $\theta_{\text{ист}}$ дифракционная картина начинает смазываться при

$$\theta_{\text{ист}} \sim \frac{l}{R}, \quad (3)$$

где R — расстояние от Земли до слоя, содержащего неоднородности. Это позволяет наблюдать источники с $\theta_{\text{ист}} < \frac{l}{R}$ по наличию мерцаний. При движении неоднородностей со скоростью v относительно Земли (см. рисунок) дифракционная картина движется по Земле с той же скоростью, что приводит к флуктуациям интенсивности радиоизлучения в точке наблюдения («мерцаниям») с периодом

$$\tau = \frac{L}{v}. \quad (4)$$



Так как обнаруженные в работах ⁷⁻⁹ колебания интенсивности радиоизлучения имеют период $\tau \sim$ несколько секунд, они не могут принадлежать изменениям интенсивности самих источников, поскольку τ намного меньше времени распространения света через источник. Отвергая также ионосферное происхождение наблюдаемых мер-

*) Чтобы понять возникновение масштаба $L \sim l/|\Delta\psi|$, представим себе, что слой неоднородностей сместился в своей плоскости на расстояние l . Тогда через фиксированную точку наблюдения пройдут лучи, искажение фазы которых меняется в пределах от $-|\Delta\psi|$ до $|\Delta\psi|$. Так как изменение фазы на величину $\Delta\psi \sim 1$ отвечает переходу от минимума к максимуму дифракционной картины (или наоборот), мы видим, что смещение последней на расстояние l сопровождается чередованием $\sim |\Delta\psi|$ полос, что и приводит к указанному масштабу.

При наблюдении в 1964 г. Хэвишем, Скоттом и Уилсом ряда источников радиоизлучения на волне $\lambda = 1,7$ м некоторые из них обнаружили сильно выраженные флуктуации радиоизлучения с периодом $\tau \sim 1-2$ сек. Аналогичные наблюдения были проведены несколько позже на РАС ФИАН над источником ЗС 48 на волне 3,5 м ⁸. Наблюдавшиеся при этом мерцания имели период ~ 3 сек. В 1965 г. были обнаружены флуктуации радиоизлучения Крабовидной туманности на волне $\lambda = 7,9$ м ⁹ с характерным периодом \sim несколько секунд. В этих наблюдениях глубина модуляции интенсивности обладает хорошо выраженной годовой зависимостью. Она уменьшается по мере приближения источника к Солнцу и пропадает совсем, когда источник проходит вблизи Солнца.

паний *), авторы работ ⁵⁻⁷ приходят к выводу о том, что наблюдаемые мерцания радиоисточников обусловлены дифракцией радиоволн на неоднородностях свёрхкороны Солнца, которые движутся со скоростью солнечного ветра, достигающей в соответствии с теорией Паркера ¹² около 300 км/сек на расстоянии $l \sim 100 R_{\odot}$. Параметры неоднородностей свёрхкороны Солнца, которые оцениваются из данных по рассеянию радиоволн, хорошо согласуются с соотношениями (3), (4) и соответствующими масштабами дифракционной картины.

Изучение свойств свёрхкороны Солнца методом «просвечивания» до расстояний $\sim 60 R_{\odot}$ от Солнца ^{10, 11} и экстраполяция результатов этих наблюдений на большие расстояния позволяет оценить минимальное расстояние луча зрения до Солнца r_{\min} , при котором источник с заданным угловым размером ($\sim 1''$) удовлетворяет условию (3), т. е. минимальное расстояние луча зрения до Солнца, при котором будут наблюдаться мерцания.

Оценки показывают, что мерцания радиоисточников в метровом диапазоне волн должны возникать при $r_{\min} \sim 100 R_{\odot}$, что согласуется с наблюдениями ^{7, 8}. Наблюдаемое методом «просвечивания» увеличение видимых размеров источника $\Phi_{\text{расс}}$, при котором выполняется соотношение ⁶

$$\Phi_{\text{расс}} > l/R, \quad (5)$$

позволяет оценить верхний предел масштаба l . Согласно оценкам ¹⁰ $l \leq 5000$ км при $r = 60 R_{\odot}$. Знание l в свою очередь позволяет оценить верхний предел угловых размеров радиоисточника, при котором возможно наблюдение мерцаний и который зависит от λ и r ⁷.

Таким образом, недоступные непосредственному измерению малые угловые радиоразмеры источников могут быть получены косвенно, по возникновению и исчезновению мерцаний интенсивности радиоизлучения. Наблюдение мерцаний позволяет также исследовать тонкую структуру протяженных объектов. Так, например, в Крабовидной туманности удалось обнаружить мощный компактный радиоисточник с угловыми размерами $\sim 0,1''$ ⁹. С другой стороны, наблюдение радиомерцаний в совокупности с непосредственным измерением скорости солнечного ветра позволяет изучать структуру свёрхкороны Солнца $l = l(r)$ на столь больших расстояниях от Солнца ($r \geq 100 R_{\odot}$), которые недоступны другим радиоастрономическим методам. Следует отметить, что область свёрхкороны Солнца $r \sim 100 R_{\odot}$ до сих пор оставалась недоступной для регулярных наблюдений. Наблюдение радиомерцаний позволяет в принципе осуществить регулярные наблюдения свёрхкороны на расстоянии $\sim 100 R_{\odot}$ и проследить зависимость $\tau = \tau(r)$ для различных фаз солнечной активности.

Н. А. Лотова, В. М. Финкельберг

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Гетманцев, В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ **20**, 347 (1950).
2. С. Hazard, M. V. Maskey, A. J. Shimmins, Nature **197**, 1037 (1963).
3. В. С. Артюх, В. В. Виткевич, В. И. Власов, Г. А. Кафаров, Л. И. Матвеевко, Астрон. ж. (1965); В. Н. Andrew, H. J. V. A. Branson, D. Wills, Nature **203**, 171 (1964).
4. В. Л. Гинзбург, ДАН СССР **109**, 61 (1956).
5. В. В. Писарева, Астрон. ж. **35**, 112 (1958).
6. В. В. Писарева, Астрон. ж. **36**, 427 (1959).
7. A. Hewish, P. F. Scott, D. Wills, Nature **203**, 1214 (1964).
8. Т. Д. Антонова, В. В. Виткевич, В. И. Власов, ДАН СССР (1965).
9. A. Hewish, S. E. Okoye, Nature **207**, 59 (1965).
10. A. Hewish, J. D. Windham, Month. Not. **126**, 469 (1963).
11. В. И. Бабий, В. В. Виткевич, В. И. Власов, М. В. Горелова, А. Г. Суховой, Астрон. ж. **42**, 107 (1965).
12. E. N. Parker, Astrophys. J. **131**, 664 (1958).

*) Если бы мерцания имели ионосферную природу, то согласно условию (3) неоднородностям пришлось бы приписать столь малый размер (~ 10 км), что рассеяние радиоволн на таких неоднородностях должно было бы приводить к видимым угловым размерам $\geq 10''$, что абсурдно.

