

О ВЛИЯНИИ НЕТОЧНОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ И НЕЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННЫ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ФАЗЫ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА

А. Ф. Дравский

Обсуждается определение базы радиointерферометра. Для антенн, имеющих пересекающиеся оси вращения, предлагается принимать в качестве базы вектор, соединяющий точки пересечения осей. Приводится выражение, определяющее влияние неточности наведения антенны на фазу интерференционного сигнала. Показано, что случайная ошибка в фазе интерференционного сигнала, связанная с неточностью наведения современных антенн ($D/\lambda \approx 10^3$), весьма мала и составляет величину $\sim 10^{-5}$ рад. Приводится выражение для фазовой ошибки, связанной с такой жесткостью антенны, как смещение облучателя по дуге радиуса, равного фокусному расстоянию.

The definition of the interferometer baseline is discussed. It is proposed for the antennas with intersecting axes of rotation to use as a base the vector connecting the points of intersection of the axes. The formula which depicts the influence of the tracking error of the phase of the interference signal is given. It is shown that the random phase error of the interference signal for modern antennas ($D/\lambda \approx 10^3$) is sufficiently small $\sim 10^{-5}$ rad. The formula for the phase error due to the displacement of the feed along the arc whose radius is equal to the focal distance is given.

Введение

Не вызывает сомнения важность превращения радиointерферометров со сверхдлинными базами и автономными приемниками (будем называть их ГБИ — глобально базовыми интерферометрами) в фазостабильные интерферометры, способные регистрировать не только амплитудный спектр Фурье составляющих распределения радиояркости наблюдаемых источников, но и их фазы. Это сразу дало бы возможность строить истинные распределения яркости источников, а не создавать некоторые из бесчисленного множества возможных моделей, а также измерять с точностью до 10^{-3} сек. дуги положения радиоисточников. По нашему мнению, эти две проблемы являются фундаментальными в глобально базовой интерферометрии.

До сих пор ГБИ не могут измерять фазы Фурье компонент распределения яркости, но в 1968 г. высказана идея [1] «опорного источника», позволяющая сделать первые шаги в нужном направлении. И такие шаги уже предпринимаются [2—4]. Идея эта по существу состоит в сравнении фазы интерференционного сигнала, полученного от измеряемого источника с помощью данного ГБИ, с фазой интерференционного сигнала, полученного от некоего опорного источника с помощью того же ГБИ. Предполагается, что ГБИ быстро переключается с наблюдения исследуемого источника на опорный или что на каждом конце базы ГБИ имеются по две антенны, наблюдающих соответственно за исследуемым и опорным источ-

никами. При этом, если поочередное наведение на источники одной антенной или одновременное наблюдение двух источников разными антеннами не вносит заметных фазовых искажений в интерференционные сигналы, исключается целый ряд неизвестных параметров, влияющих на фазу интерференционного сигнала (неизвестные фазы и частоты местных гетеродинов, неточность сличения местных часов, в значительной степени влияние атмосферы). Все это приближает нас к возможности создать инструмент ГБИ, весьма точно измеряющий разность угловых координат радиоисточников. Однако ни в одной из перечисленных статей, посвященных в какой-то степени развитию этой идеи, не оцениваются возможные фазовые искажения, связанные с жесткостью конструкции антенны и неточностью наведения антенны на источники. Правда, в работе [5] сообщается об экспериментальной проверке влияния на фазу интерференционного сигнала неточности наведения и утверждается, что оно пренебрежимо мало, однако не приводится никаких цифр и оценок. Без исследования влияния этих факторов на результаты измерений нельзя рассчитывать на возможности метода «опорного объекта».

В настоящей статье обсуждается определение базы радиоинтерферометра и показывается, что его следует выбирать, исходя из применяемых антенн интерферометра и конкретного вида их монтажных, оценивается влияние неточности наведения радиотелескопа и жесткости его конструкции на фазовые ошибки ГБИ в фазостабильном режиме. Заметим, что все результаты оценок и расчетов, проведенные здесь, имеют прямое отношение и к майкельсоновской радиоинтерферометрии (с общим гетеродином и небольшой базой).

В двух основных задачах, заключающихся в определении распределения яркости по радиоисточникам и в определении положения радиоисточников, основная информация заключена в фазах интерференционных сигналов, т. е. в положении интерференционных лепестков, получаемых при наблюдениях радиоисточников. Причем, точности измерения фаз должны быть чрезвычайно высокими. Например, в осуществленных экспериментах [2, 5—7] по проверке общей теории относительности при измерениях отклонения луча света от радиоисточника в поле тяготения Солнца получена точность измерения разности фаз интерференционных сигналов, составляющая несколько процентов от периода интерференционного сигнала. Однако этого оказалось недостаточно, чтобы отдать предпочтение одной из двух конкурирующих теорий: общей теории относительности Эйнштейна или скалярно-тензорной теории Бранса—Дике. Стремиться к предельно точным измерениям фаз естественно, так как это определяет точность восстановления картины распределения яркости источников, точность определения их координат и открывает принципиально новые возможности измерений.

Что принять за базу ГБИ?

Общепризнано, что за базу интерферометра следует принимать вектор, соединяющий фазовые центры двух антенн радиотелескопов (см., например, [8]). Покажем, что это не всегда целесообразно. Принимать — это значит включить этот вектор в уравнения для фазы интерференционного сигнала. Представим себе, что ГБИ состоит из двух разных по размерам радиотелескопов параболического типа. Будем считать, что фазовые центры антенн расположены близко к их фокусам. Вращаются антенны, как правило, вокруг некоторых осей, далеко отстающих фокусов, на расстояниях порядка диаметра зеркала (рис. 1). Примем, что антенны имеют центры вращения O и O' (это соответствует случаю, когда в азимутальной или экваториальной монтажке две взаимно перпендикулярные

оси вращения пересекаются, точку пересечения осей назовем центром вращения). В этом случае при наблюдениях источников фазовые центры F и F' перемещаются по поверхностям шаров различных радиусов. Ясно, что база \bar{B} будет иметь и размер, и ориентацию, зависящие от координат источников β . Это неудобно, так как приводит к систематической фазовой ошибке, зависящей от координат наблюдаемых источников. Кроме того,

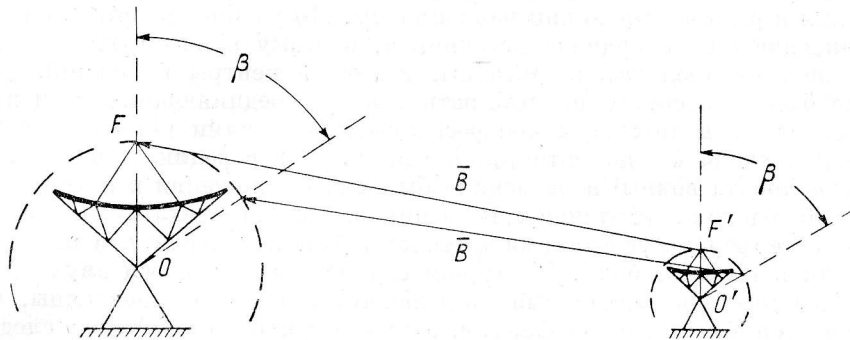


Рис. 1. К традиционному определению базы интерферометра.

Пояснения в тексте.

такое определение базы совершенно произвольно, не соответствует действительной базе и не диктуется какими-либо преимуществами.

Очевидно, в качестве базы необходимо принять вектор, соединяющий какие-то характерные точки антенн, лежащие на их оптических осях, т. е. точки, лежащие в серединах участков фронта волны, принимаемых антеннами, и, если возможно, выбрать эти точки так, чтобы они не меняли своего положения в пространстве при наблюдениях различных источников. В этом случае база не будет меняться в зависимости от координат. Такими точками могут быть только центры вращений антенн.

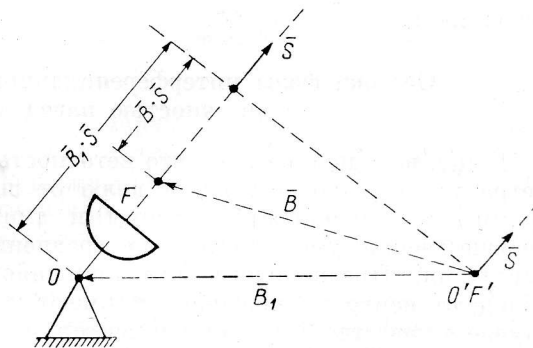


Рис. 2. Выбор определения базы интерферометра.

Пояснения в тексте.

Найдем связь между общепринятым определением базы \bar{B} как вектора, соединяющего фазовые центры, и базой B_1 , определяемой как вектор, соединяющий центры вращения антенн. На рис. 2 изображен двухэлементный интерферометр. У одного элемента центр вращения O и фазовый центр F пространственно разнесены, у другого они (O' и F') совмещены, \bar{S} — единичный вектор, определяющий направление на источник. База входит в выражение для фазы интерференционного сигнала как множитель скалярного произведения $\bar{B} \cdot \bar{S}$. Из рисунка видно, что фазы интерференционных сигналов, соответствующие этим базам, будут отличаться на постоянную величину

$$\frac{2\pi}{\lambda} (\bar{B}_1 \cdot \bar{S} - \bar{B} \cdot \bar{S}) = \frac{2\pi}{\lambda} OF = \text{const},$$

где λ — длина волны. Эта постоянная разность фаз означает, что сигнал регистрируется в этих двух случаях в разных точках, отстоящих друг от друга на OF . На самом деле сигнал регистрируется в некоторой точке, не совпадающей ни с O , ни с F , и эта постоянная разность фаз не играет роли, т. е. базы B_1 и B одинаково неточно характеризуют положение регистратора электромагнитной волны. Указываемые ими положения отличаются на некоторую постоянную величину от действительного положения и в этом смысле они равноправны. Но удобнее работать с базой, не зависящей от координат источников, поэтому в интерферометре, содержащем параболические антенны, имеющие центры вращений, в качестве базы целесообразно выбирать вектор, соединяющий эти центры.

Поскольку в антенне с непересекающимися осями нет такой точки, которая лежала бы на оптической оси (т. е. в середине принимаемого участка фронта волны) и не меняла бы своего положения в пространстве при наблюдениях различных источников, можно сделать заключение, что в интерферометре с такими антеннами база переменна, что бы мы ни выбрали в качестве базы. В частном случае, когда все оси двух антенн параллельны (экваториальные монтажки) и антенны идентичны, база переносится параллельно себе, т. е. остается неизменной. Отсюда следует, что в интерферометре, содержащем антенны с азимутальными монтажками и непересекающимися осями, база всегда зависит от координат наблюдаемых источников, даже при идентичных антеннах. Переменность базы интерферометра приводит к систематическим ошибкам фазы интерференционного сигнала, которые необходимо учитывать.

В связи с многообразием типов антенн и антенных монтажек выбор базы становится вопросом, который необходимо решать, исходя из конкретно применяемых антенных систем. По-видимому, критерием при этом должен быть минимум изменчивости базы в зависимости от координат источников.

Ошибки фазы интерференционного сигнала, связанные с неточностью наведения антенны

Будем исходить из того, что неточность наведения антенны интерферометра такова, что составляет долю от ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны и амплитуда принимаемого сигнала несущественно уменьшается по сравнению с амплитудой при точном наведении. Предположим, что применяемые параболические антенны обладают центрами вращения и имеют жесткие конструкции. В данном случае в качестве базы примем вектор, соединяющий середины раскрывов антенн. Такой выбор базы делает наши рассуждения более очевидными, но не имеет принципиального значения.

На рис. 3 концы базы интерферометра изображены точками a и b . Центр вращения изображен точкой O , направление на источник — вектором \vec{S} . При неточном наведении антенны a конец базы будет перемещаться по поверхности шара радиусом, равным Oa . При ошибке наведения $\Delta\theta$ возможные положения конца базы отмечены точками $a_1 \dots a_5$, лежащими на окружности, которая проектируется на прямую линию. При этом будут возникать два эффекта, приводящих к ошибке в фазе интерференционного сигнала.

1. Изменяется проекция базы на направление \vec{S} , т. е. появляется разность хода Δl плоской волны до середины раскрыва зеркала по сравнению со случаем точного наведения. Это приводит к фазовой ошибке $\delta\varphi_1 = 2\pi\Delta l/\lambda$ в главном фокусе и в интерференционном сигнале. При этом величина и знак фазовой ошибки не зависят от направления отклонения антенны, а только от угла $\Delta\theta$. Исходя из того что точка a и, например,

a_5 лежат на окружности радиуса Oa и считая угол $\Delta\theta$ малым (много меньше радиана), найдем

$$\Delta l = \rho (1 - \cos \Delta\theta) \approx \rho \Delta\theta^2 / 2,$$

где ρ — расстояние от центра вращения O до середины раскрыва зеркала.

Отсюда, обозначая диаметр зеркала D , длину волны λ и ширину диаграммы антенны по уровню половины мощности $\Theta = \lambda/D$, получим (в радианах)

$$\delta\varphi_1 = 2\pi \frac{\lambda \cdot \rho}{2D^2} \left(\frac{\Delta\theta}{\Theta} \right)^2. \quad (1)$$

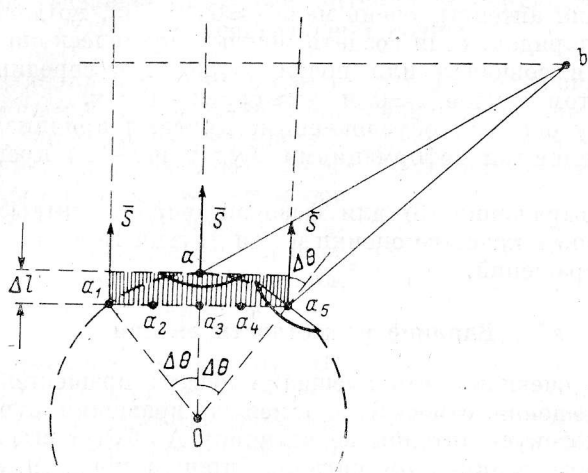


Рис. 3. К выводу фазовой ошибки интерферометра, связанной с неточностью наведения антенны.

Пояснения в тексте.

Из-за наклона плоскости раскрыва зеркала к плоскости синфазного фронта волны на угол $\Delta\theta$ появляется антисимметричное распределение фаз поля на раскрыве с линейной зависимостью от расстояния до оси симметрии, лежащей в плоскости раскрыва и проходящей через его середину. Такое распределение фаз поля на раскрыве зеркала при симметричных форме зеркала и облучении не привело бы к изменению результирующей фазы поля в главном фокусе, если бы направление распространения волны совпадало с направлением оси зеркала, так как каждой составляющей поля с отрицательным фазовым сдвигом относительно случая синфазного поля на раскрыве найдется составляющая, имеющая равный по величине положительный фазовый сдвиг. Сложение таких полей в фокусе несколько уменьшит амплитуду суммарного поля, но фаза останется неизменной и равной фазе при синфазном распределении поля на раскрыве. Однако непараллельность оси антенны и направления распространения волны сама по себе приводит к фазовой ошибке $\delta\varphi_2$ в фокусе и в интерференционном сигнале относительно случая параллельности.

На с. 205, 206 выводится выражение для фазовой ошибки $\delta\varphi_2$; на основании сказанного выше при выводе не учитывается линейный фазовый набег на раскрыве. Получено выражение

$$\delta\varphi_2 \approx 2\pi \frac{\lambda}{64F} \left(\frac{\Delta\theta}{\Theta} \right)^2, \quad (2)$$

где F — фокусное расстояние, $\delta\varphi_2$ измерено в радианах.

Фазовые ошибки в интерференционном сигнале $\delta\varphi_1$ и $\delta\varphi_2$ имеют всегда один и тот же знак, происходит запаздывание сигнала (сигналу необходимо пройти дополнительный путь), поэтому сложим их арифметически и получим суммарную ошибку

$$\delta\varphi = 2\pi \left[\frac{\lambda\rho}{2D^2} + \frac{\lambda}{64F} \right] \left(\frac{\Delta\theta}{\theta} \right)^2. \quad (3)$$

Численно оценим $\delta\varphi$. Предположим, что $\rho = F = 25$ м, $\lambda = 5$ см, $D = 50$ м, $\frac{\Delta\theta}{\theta} = 0.1$, тогда $\delta\varphi = 2\pi [2.5 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-7}]$.

Ошибка в фазе интерференционного сигнала, обусловленная неточностью наведения антенны, очень мала ($\approx 6 \cdot 10^{-6} \pi$), но даже и ее можно уменьшить на порядок, если создать монтировку телескопа такую, чтобы центр вращения совпадал или почти совпадал с серединой раскрыва антенны.* В этом случае $\rho \approx 0$ и $\delta\varphi \approx \delta\varphi_2 \approx 6 \cdot 10^{-7} \pi$.

По-видимому ошибки, обусловленные другими причинами, например весовыми и тепловыми деформациями, будут намного превосходить эту величину.

Очевидно, выражение (3) для фазовой ошибки интерференционного сигнала пригодно в качестве оценки и для других типов антенн, не имеющих центров вращений.

Влияние нежесткости антенн

Совершенно очевидно, что смещения центра вращения антенны или радиальные смещения относительно центра вращения отражающей поверхности, или фокуса антенны на величину $\Delta\rho$ будут вызывать фазовые ошибки в интерференционном сигнале, пропорциональные первой степени $\Delta\rho$. Поскольку в фазостабильной интерферометрии нежелательны ошибки даже в сотые доли 2π , т. е. в сотые доли ширины интерференционного лепестка, то ясно, что она предъявляет, по-видимому, наиболее строгие требования к жесткости антенных конструкций. Если же антенная система обладает принципиально переменными параметрами, как это имеет место в гомологических конструкциях антенн [9] или в антеннах типа АПП [9], то фазостабильная интерферометрия предъявляет самые жесткие требования к контролируемости этих параметров или к контролируемости фазовых изменений при наблюдениях источников в различных положениях.

Рассмотрено влияние такого типа нежесткости конструкции антенны, как перемещение облучателя, стоящего в фокусе, по дуге окружности с радиусом, равным фокусному расстоянию, и центром — в основании зеркала. Получено выражение для фазовой ошибки $\delta\varphi_0$ интерференционного сигнала при условии, что плоскость раскрыва и синфазный фронт волны параллельны, но облучатель сместился из своего идеального положения на угол $\Delta\theta$:

$$\delta\varphi_0 = 2\pi \frac{F\lambda}{2D^2} \left(\frac{\Delta\theta}{\theta} \right)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{4F}{D} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{D}{4F} \right)^2 \right]^2} - \frac{1}{8 \left[1 + \left(\frac{D}{4F} \right)^2 \right]} - 2 \ln \left[1 + \left(\frac{D}{4F} \right)^2 \right] \right] \right\}. \quad (4)$$

Численная оценка для тех же параметров, что и ранее, дает достаточно малую величину $\delta\varphi_0 = 1.6 \cdot 10^{-5} \pi$ рад.

* 76-метровый радиотелескоп в Джодрелл-Бэнк имеет такую монтировку.

Фазовые ошибки интерферометра, вызванные неточностью наведения антенны или нежесткостью конструкции телескопа (см. уравнения (3) и (4)) не зависят от базы интерферометра, и, следовательно, при одинаковых конструкциях телескопов, применяемых для малобазовой или глобально базовой интерферометрии, будут получаться одинаковые фазовые ошибки в долях периода интерференционного сигнала.

Автор выражает признательность профессору Н. А. Есепкиной за ценные критические замечания.

Фазовая ошибка интерферометра, обусловленная непараллельностью оси антенны и направления распространения волны

Для определения изменения фазы поля в фокусе зеркала, связанного с непараллельностью оси зеркала и направления падения лучей (по сравнению со случаем их параллельности), найдем разность хода двух лучей acF и adF (рис. 4), проходящих через произвольную точку раскрыва: одного, идущего под углом $\Delta\theta$ к оси зеркала, другого — параллельно оси. Среднее по всему раскрытию значение этой разности, деленное на длину волны, примем за фазовую ошибку в долях от 2π рад.

Допустим, что угол $\Delta\theta$, на который расходятся ось зеркала и падающие лучи, много меньше радиана. Заметим, что при подсчете среднего значения разности хода лучей, проходящих через различные точки раскрытия зеркала к фокусу, мы не учитываем изменения амплитуды поля (можно показать, что допускаемая ошибка при этом будет мала).

Выберем систему прямоугольных координат xuz для зеркала, как показано на рис. 4, где зеркало изображено в двух проекциях. Фокусное расстояние OF обозначим F . Лучи падают параллельно плоскости xOz под углом $\Delta\theta$ к оси зеркала. Точка c расположена на поверхности зеркала. Путь луча из точки a в точку F равен $ac + cF = ac + (cF + bc) - bc$. Но $(cF + bc)$ представляет собой ход луча, параллельного оси. В параболическом зеркале он не зависит от места на раскрытии. Разность хода лучей наклонного и параллельного оси

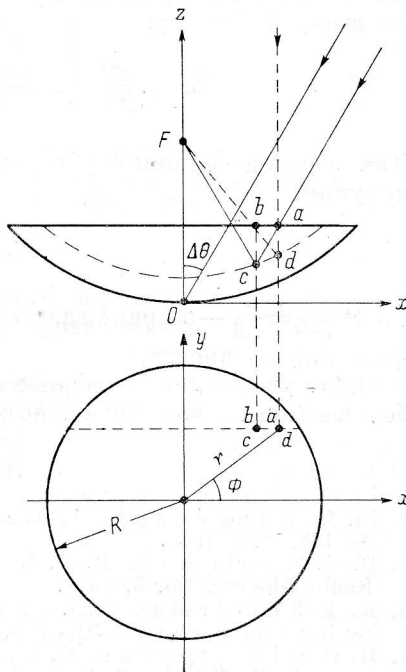


Рис. 4. К выводу фазовой ошибки интерферометра, связанной с наклоном фронта волны по отношению к раскрытию антенны.

$$\Delta S_a = (ac - bc) \approx bc \frac{\Delta\theta^2}{2}, \text{ так как } \Delta\theta \ll 1.$$

В выбранной системе координат уравнение параболической поверхности $z = \frac{1}{4F} (x^2 + y^2)$. Далее можно написать четыре очевидных равенства:

$$bc = \frac{1}{4F} [R^2 - (x_b^2 + y_b^2)],$$

$$x_b = x_a - ab,$$

$$y_b = y_a, \\ ab = bc \cdot \operatorname{tg} \Delta\theta,$$

где x_a, y_a, x_b, y_b — координаты точек a и b .

Решая эту систему уравнений относительно bc и считая $\operatorname{tg} \Delta\theta \approx \Delta\theta$, получим для разности хода ΔS_a :

$$\Delta S_a = F \left(\sqrt{1 - \frac{x_a}{F} \Delta\theta + \left(\frac{R}{2F}\right)^2 \Delta\theta^2 - \left(\frac{y_a}{2F}\right)^2 \Delta\theta^2} - 1 \right) + \frac{\Delta\theta}{2} x_a.$$

Разложив корень в степенной ряд и опустив члены выше второй степени $\Delta\theta$, получим

$$\Delta S_a = \frac{\Delta\theta^2}{8F} (R^2 - r_a^2),$$

где $r_a^2 = x_a^2 + y_a^2$.

Выберем на раскрыве зеркала полярную систему координат (r, Φ) , как показано на рис. 4, и найдем среднее значение разности хода $\overline{\Delta S}$ по всему раскрыву:

$$\overline{\Delta S} = \frac{\Delta\theta^2}{8F} \left(R^2 - \frac{2}{\pi R^2} \int_0^\pi \int_0^R r_a^2 r_a d\Phi dr_a \right) = \frac{R^2}{16F} \Delta\theta^2.$$

Для фазовой ошибки $\delta\varphi_2$, обусловленной наклоном лучей к оси зеркала, получим

$$\delta\varphi_2 = 2\pi \frac{\lambda}{64F} \left(\frac{\Delta\theta}{\Theta} \right)^2,$$

где $\Theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{\lambda}{2R}$ — ширина главного лепестка диаграммы антенны по уровню половины мощности.

Если учесть неравномерное облучение зеркала, то $\delta\varphi_2$ будет несколько больше (менее, чем вдвое), но для получения оценки это несущественно.

Литература

1. Ю. Н. Парийский, А. А. Стоцкий, Изв. Глав. астроном. обсерв. в Пулковской обсерватории, № 188, 195, 1972.
2. D. O. Muhleman, R. D. Ekers, E. B. Fomalont, Obs. Owens Valley Radio Observ., No. 5, 1970.
3. K. I. Kellerman, Sci. Amer., 226, No. 2, 72, 1972; см. также перевод: К. Келлерман, УФН, 109, вып. 3, 591, 1973.
4. H. F. Hinteregger, G. W. Catuna, C. C. Counselman, R. A. Ergas, R. W. King, C. A. Knight, D. S. Robertson, A. E. E. Rogers, I. I. Shapiro, A. R. Whitney, T. A. Clark, L. K. Hutton, G. E. Marandino, R. A. Perley, G. Resch, N. R. Vandenberg, Nature Phys. Sci., 240, No. 103, 159, 1972.
5. G. A. Seielstad, R. A. Sramek, K. W. Weiler, Obs. Owens Valley Radio Observ., No. 4, 1970.
6. R. A. Sramek, Ap. J., 167, L55, 1971.
7. J. M. Riley, Mon. Not. R. astron. Soc., 161, 11, 1973.
8. C. M. Wade, Ap. J., 162, 381, 1970.
9. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973, гл. 4, 5.