

А. В. БУТКЕВИЧ

ПРИМЕНЕНИЕ ДЛИННОБАЗИСНОЙ РАДИО- ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОДЕЗИИ (ортогональная триангуляция)

В геодезии и навигации широко используются радиоинтерференционные методы наблюдений наземных источников излучения (системы «Декка», «Лоран», РГСЦ и др.), позволяющие определять разности расстояний от пункта наблюдений до двух исходных пунктов. Затем стали использоваться радиоинтерференционные наблюдения ИСЗ, позволяющие определять их угловые координаты (азимут и высоту) с точностью до нескольких десятков секунд (системы «Минитрек» и др.).

Действительно, измерив разность фаз $\Delta\psi$ радиосигналов, поступающих со спутника S на концы базы AB (длиной d на рис. 1), можно определить разность $\Delta r'$ расстояний r_2' и r_1' (разность ходов радиоволн)

$$\Delta r' = \lambda(\Delta\psi + 2k\pi), \quad (1)$$

где λ — длина волны; $2k\pi$ — целое число циклов.

По малости угла Θ (при длине базы порядка 1 км и высоте полета ИСЗ 200—300 км он не превышает 15—20') можно пренебрегать различием расстояний $\overline{SD'}$ и \overline{SD} и с погрешностью $\frac{r'\Theta'^2}{2\rho'^2} \leq 1-2$ м принимать $\overline{BD} \simeq \overline{BD'} = \Delta r'$. Тогда

$$\cos \beta = \frac{\Delta r'}{d}, \quad (2)$$

Обычно определяют два пространственных угла β и γ на ИСЗ по отношению к двум базам AC и AB , расположенным по меридиану и по 1 вертикалу (рис. 2). Из сферического треугольника csb , построенного с помощью единичной сферы и трехгранника $CASB$, нетрудно получить формулы для вычисления азимута A и высоты h ИСЗ

$$\cos \gamma = \cos A \cos h; \quad (3)$$

$$\cos \beta = \sin A \cos h. \quad (4)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} A = \frac{\cos \beta}{\cos \gamma}; \quad (5)$$

$$\cos h = \cos \gamma \sec A = \cos \beta \operatorname{cosec} A. \quad (6)$$

Это прямая задача радиоинтерферометрии.

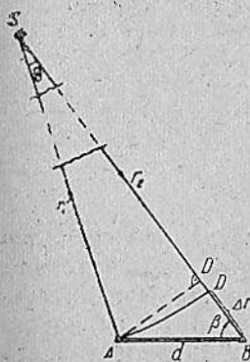


Рис. 1. Радиоинтерференционные наблюдения ИСЗ.

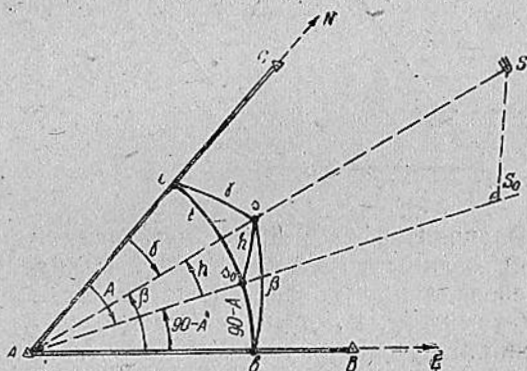


Рис. 2. К выводу формул для определения азимута и высоты ИСЗ по радиоинтерференционным наблюдениям.

До последнего времени использование для геодезических целей радиотелескопов, удаленных друг от друга на десятки и сотни километров, считалось невозможным из-за сильных искажений и трудности синхронизации наблюдений.

Но в 1963 г. советские радиоастрономы Н. С. Кардашов, Г. Б. Шоломницкий и Л. К. Матвеев предложили метод сверхдальней или независимой радиоинтерферометрии, который позволяет получать практически неограниченное угловое разрешение. В этом методе сигналы преобразуют на каждой из антенн с помощью меток от высокостабильных атомных стандартов частоты и регистрируют на магнитных лентах («запоминают») [5]. Затем обе ленты могут быть одновременно воспроизведены с использованием для их синхронизации записанных сигналов времени. После записи магнитные ленты направляются в вычислительный центр и обрабатываются. Необходимая задержка сигналов обеспечивается путем воспроизведения одной из лент с рассчитанным нужным запаздыванием.

Этот метод стал возможным благодаря успехам квантовой радиофизики и ЭВМ. Рубидиевые генераторы обеспечивают точность порядка $1 \cdot 10^{-11}$, а современный квантовый водородный стандарт частоты имеет стабильность порядка 10^{-13} .

Такая методика позволяет использовать радиотелескопы, удаленные друг от друга на тысячи километров. Из анализа комбинированных сигналов от двух радиотелескопов, наведенных на один и тот же мощный «точечный» квазар, можно определить расстояние между этими телескопами по лучу квазара.

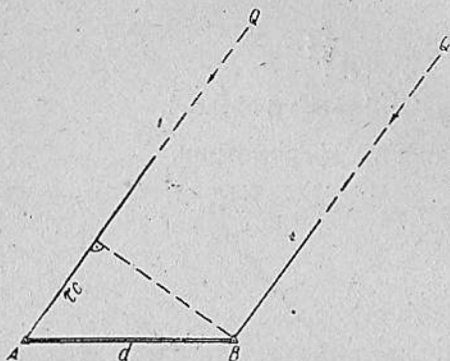


Рис. 3. Схема радионаблюдений квазара Q.

Радиоинтерферометры с независимой регистрацией сигналов были созданы в 1963 г. в США и Канаде. Такой интерферометр со сверхдлинной базой представляет электронно-вычислительный комплекс, который автоматически наводит антенны на источник излучения, принимает от него сигнал, преобразует его к виду, удобному для регистрации и обработки, запоминает миллионы *бит* в секунду и передаст в специальную ЭВМ, которая обрабатывает до 10 млн. *бит* в секунду, рассчитывает частоту интерференции и длительность задержки, осредняет результаты и выдает вероятнейшие значения.

По меткам времени и предвычисленному запаздыванию легко отыскать сигналы, соответствующие одному и тому же переднему фронту излучения, сопоставить их и точно измерить запаздывание, предполагая, что несинхронность часов δt постоянна в течение наблюдений.

Пусть A и B — радиотелескопы, установленные на поверхности Земли, а Q — квазар, действующий как точечный источник излучения в бесконечности. Приемные устройства телескопов, в зависимости от их характеристик, чувствительны в довольно широком диапазоне частот Δf , симметричном относительно f [8].

Сигналы, распространяющиеся от квазара Q со скоростью света c , поступают в точку A с запаздыванием на tc относительно точки B , что соответствует расстоянию tc (рис. 3). Если в отрезке tc заключено примерно одно и то же число волн для всех частот, воспринимаемых телескопами, то появляются ин-

терференционные полосы. При изменении расстояния τc на F длин волн (равных $c : f$) излучения в секунду комбинируемый сигнал будет содержать компоненту с частотой F , называемой частотой интерференции и определяемой формулой [8].

$$F = \frac{d(\tau c)}{dT} \cdot \frac{f}{c} = f \frac{d\tau}{dT} = -\frac{f}{c} (B \sin t_B - A \sin t_A) \cos \delta \left(\frac{dt}{dT} \right)_T, \quad (7)$$

где t_A и t_B — часовые углы квазара в пунктах A и B ; $A = \rho_A \cos \psi_A = D_A$, $B = \rho_B \cos \psi_B = D_B$ — расстояния пунктов A

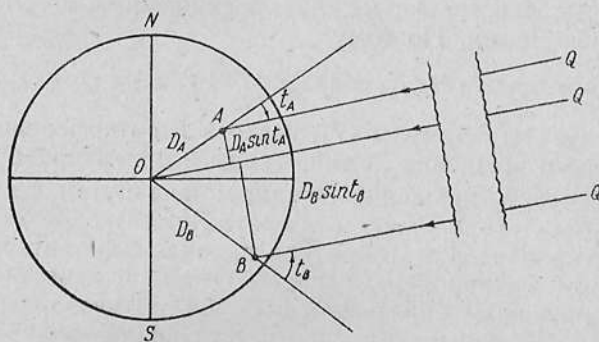


Рис. 4. Квазар и станции наблюдений на плоскости экватора.

и B от оси вращения Земли; ρ — радиус-вектор; ψ — геоцентрическая широта; f — частота наблюдаемого излучения; c — скорость света в вакууме; $\left(\frac{dt}{dT} \right)_T$ — скорость вращения Земли в момент T . Очевидно (рис. 4)

$$F = -\frac{f}{c} (D_B \sin t_B - D_A \sin t_A) \cos \delta \left(\frac{dt}{dT} \right)_T, \quad (8)$$

$$(X_B \sec L_B \sin t_B - X_A \sec L_A \sin t_A) = -\frac{Fc \sec \delta}{f \left(\frac{dt}{dT} \right)_T}$$

Из-за вращения Земли интервал запаздывания τc будет меняться во времени в зависимости от изменения угла β между базой и направлением на квазар. Монохроматическое излучение позволяет определять только частоту интерференции, а широкополосное излучение, принимаемое радиотелескопами, время τ запаздывания. Точность определения τ обратно пропорциональна ширине полосы Δf и почти не зависит от длины базы [4].

Величины τ и F являются функциями длины базы, ее направления, скорости вращения Земли и координат квазара. Если

источник колебаний в бесконечности и передний фронт волны плоский, то

$$\tau c = d \cos \beta + c \delta \tau, \quad (9)$$

где $\delta \tau$ — несинхронность часов на концах базы длиной d [4].

Запаздывание τ (требуемая поправка в радиосигналы времени), наблюдаемое в момент T , будет равно [8]

$$\tau = \frac{1}{c} [(D_B \cos t_B - D_A \cos t_A) \cos \delta + P \sin \delta], \quad (10)$$

где $P = \Delta Z$ — расстояние между проекциями точек A и B на ось вращения Земли. Поэтому

$$[(X_B \sec L_B \cos t_B - X_A \sec L_A \cos t_A) \cos \delta + (Z_B - Z_A) \sin \delta] = \tau c. \quad (11)$$

Как следует из формулы (7), частота F интерференции зависит от скорости вращения Земли, длины и ориентирования базы AB . Зная скорость вращения Земли, можно путем серии измерений частоты F (при каждом обороте Земли) определить длину и ориентировку базы (обратная задача радиоинтерферометрии или связь изолированных систем) или по известной длине и направлению базы определить координаты квазара [8].

Диапазон запаздываний, соответствующий возникновению интерференционных полос, называют интервалом корреляции $\Delta \tau = 1 : 2 \Delta f$, а соответствующее расстояние — расстояние M корреляции.

Для применяемых значений Δf расстояние корреляции порядка нескольких метров и интерференционные полосы можно наблюдать не более 1^m , пока разность расстояний до квазаров не превышает нескольких метров. Чтобы наблюдать интерференцию и при больших значениях τc , сигнал, принятый в A , искусственно задерживают на τ^s перед сложением его с сигналом, принятым в B . Практически значения τ и F предвычисляют по формулам (10) и (7), а затем измеряют малые разности между предвычисленными и наблюдаемыми значениями.

Основной источник ошибок при измерении τ и F — атмосферная рефракция, особенно ионосферная (в верхних слоях атмосферы). Ионосфера заметно влияет на фазовую скорость волн, особенно в диапазоне частот, использованных в первых опытах по связи континентов (448 мГц). Поправки за влияние ионосферы достигают 100 м, зависят от магнитной широты, активности Солнца, времени дня и обратнопропорциональны f^2 . Значит, требуется повышать частоты наблюдений. В проведенных опытах точность была около $3 \cdot 10^{-6}$, но использование водородных лазерных генераторов и повышение диапазона частот может увеличить точность в 100 и более раз. Более высокая точность чем при наземных радионизмерениях, объясняется тем, что здесь радиопульсы подавляющую часть пути проходят в пустоте.

Из-за несинхронности часов материалы наблюдений одного квазара не могут служить для определения элементов базы. Склонения квазаров, известные сейчас с точностью до $\pm 0,5-1''$, можно рассматривать как приближение и определять их поправки в процессе уравнивания вместе с элементами базы. Наблюдения трех квазаров позволяют определить как их склонения, так и элементы базы (d , ψ_{12}) и несинхронность часов δt . Величины α и направляющий угол Λ_{12} базы определяются лишь в сочетании $\Lambda_{12}-\alpha$ по наблюдениям двух квазаров в коротком

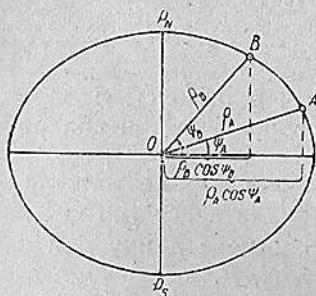


Рис. 5. Станции наблюдений на одном меридиане, квазар на экваторе и его часовой угол равен 90° .

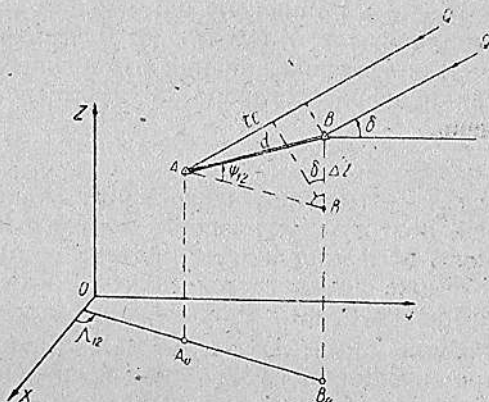


Рис. 6. Общий случай радиоинтерференционных наблюдений квазара.

интервале (например, в течение суток). Для приведения прямых восхождений квазаров в звездную систему координат нужно хотя бы один квазар отождествить с оптически видимой звездой [4]. Проф. И. Д. Жонголович [3] подчеркивает, что мы получаем здесь длины больших хорд и углы между ними и квазарами, а не абсолютные направления.

Обработка наблюдений. Зарубежные авторы [7—9] вначале рассматривают частные случаи, когда квазар находится на полюсе (при этом задержка постоянна), и когда квазар на экваторе и оба пункта лежат на одной параллели (или экваторе), рис. 4. В этом случае проекция L базы на линию перпендикулярную плоскости, проходящей через квазар и ось вращения Земли («линию фронта волн»), равна

$$L = \frac{cF_{\max}}{f \frac{dt}{dT}} = D_A \sin t_A - D_B \sin t_B. \quad (12)$$

Наконец, когда квазар на экваторе и его часовой угол равен 90° , а оба пункта лежат на одном меридиане (рис. 5), то проек-

ция L_0 базы на линию, перпендикулярную плоскости квазар—ось Земли (на экватор), равна

$$L_0 = D_A - D_B. \quad (13)$$

В общем случае [8—9] разность ходов получается из измерения запаздывания, а второй компонент базы («ширина фронта импульсов») по измерению частоты интерференции (рис. 6).

Таким образом, существующие методы вычислений позволяют на основе многократных продолжительных наблюдений определять по способу наименьших квадратов с помощью ЭВМ координаты X , Y пунктов A , B и разность их координат ΔZ .

Для уравнивания измеренных величин c и F и координат квазара, согласно [8], [9], используется матричное уравнение

$$AX + W = V, \quad (14)$$

где X — матрица неизвестных (поправок в радиусы параллелей, долготу L_A , разность долгот ΔL , разность ΔZ , несинхронность $\delta\tau$ и координаты квазара α , δ).

Ниже предлагается другой метод обработки, позволяющий из краткосрочных наблюдений быстро получать все три составляющие хорды \overline{AB} — ΔX , ΔY , ΔZ , а по ним ее длину d и направляющие углы Ψ , Λ или косинусы M , N , P .

Предположим, что выполнены одновременные наблюдения трех квазаров с известными координатами $\alpha_1, \delta_1, \alpha_2, \delta_2, \alpha_3$ и δ_3 и получены запаздывания τ_i и частоты F_i . Конечно, наблюдать одновременно одним телескопом три квазара, нельзя, но можно привести к одному моменту их наблюдения, выполненные на коротком интервале времени, по дифференциальной формуле

$$d(\tau c) = (D_A \sin t_A - D_B \sin t_B) \cos \delta dt, \quad (15)$$

или по формуле конечных приращений

$$\Delta(\tau c) = [D_B (\cos t'_B - \cos t''_B) - D_A (\cos t'_A - \cos t''_A)] \cos \delta. \quad (16)$$

Таким образом, первую задачу можно сформулировать так: измерены три разности расстояний $\Delta r'_1, \Delta r'_2, \Delta r'_3$ до трех квазаров с концов базы \overline{AB} , то есть три проекции базы на направлении трех квазаров $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, и требуется определить длину и направление базы, то есть хорды \overline{AB} .

Напишем очевидные равенства

$$\Delta r'_1 = d \cos(d; \Delta r'_1); \Delta r'_2 = d \cos(d; \Delta r'_2); \Delta r'_3 = d \cos(d; \Delta r'_3). \quad (17)$$

$$\text{Но} \quad \cos(d; \Delta r'_1) = m_1 M_{12} + n_1 N_{12} + p_1 P_{12}, \quad (18)$$

где m_1, n_1, p_1 — направляющие косинусы квазара σ_1 :

$$m_1 = \cos \delta_1 \cos \alpha_1; n_1 = \cos \delta_1 \sin \alpha_1; p_1 = \sin \delta_1, \quad (19)$$

а M_{12}, N_{12}, P_{12} — неизвестные направляющие косинусы базы \overline{AB} .

Из (18) получим уравнение

$$\frac{\Delta r_2'}{d} = m_1 M_{12} + n_1 N_{12} + p_1 P_{12}. \quad (20)$$

Аналогично этому для второго и третьего квазаров:

$$\frac{\Delta r_2'}{d} = m_2 M_{12} + n_2 N_{12} + p_2 P_{12}; \quad (21)$$

$$\frac{\Delta r_3'}{d} = m_3 M_{12} + n_3 N_{12} + p_3 P_{12}, \quad (22)$$

или

$$\Delta r_1' = dm_1 M_{12} + dn_1 N_{12} + dp_1 P_{12}. \quad (23)$$

Но

$$dM_{12} = \Delta X_{12}; \quad dN_{12} = \Delta Y_{12}; \quad dP_{12} = \Delta Z_{12}. \quad (24)$$

Поэтому получается три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \Delta X_{12} + n_1 \Delta Y_{12} + p_1 \Delta Z_{12} &= \Delta r_1' \\ m_2 \Delta X_{12} + n_2 \Delta Y_{12} + p_2 \Delta Z_{12} &= \Delta r_2' \\ m_3 \Delta X_{12} + n_3 \Delta Y_{12} + p_3 \Delta Z_{12} &= \Delta r_3' \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Решение этих уравнений дает разности координат ΔX_{12} , ΔY_{12} , ΔZ_{12} , а затем

$$\operatorname{tg} \Lambda_{12} = \frac{\Delta Y_{12}}{\Delta X_{12}}; \quad (26) \quad \operatorname{tg} \psi_{12} = \frac{\Delta Z_{12}}{\sqrt{\Delta X_{12}^2 + \Delta Y_{12}^2}}; \quad (27)$$

$$d_{12} = \Delta X_{12} \sec \psi_{12} \sec \Lambda_{12} = \Delta Y_{12} \sec \psi_{12} \operatorname{cosec} \Lambda_{12} = \Delta Z_{12} \operatorname{cosec} \psi_{12}. \quad (28)$$

В матричной форме уравнение (25) примет вид

$$\begin{bmatrix} m_1 & n_1 & p_1 \\ m_2 & n_2 & p_2 \\ m_3 & n_3 & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta r_1' \\ \Delta r_2' \\ \Delta r_3' \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Отсюда

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & n_1 & p_1 \\ m_2 & n_2 & p_2 \\ m_3 & n_3 & p_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta r_1' \\ \Delta r_2' \\ \Delta r_3' \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Пример обработки наблюдений (макетных).

Исходные данные:

1. Координаты квазаров.

t_1 248°56'48",2	t_2 355°24'55",7	t_3 306°51'59",6
δ_1 57°03'16",3	δ_2 60°42'33",0	δ_3 41°24'45",9

2. Разности расстояний.

$$\Delta r_1' | 265\,659,3 \text{ м} \quad \Delta r_2' | -55\,049,4 \text{ м} \quad \Delta r_3' | 99\,983,4 \text{ м}$$

Исходные уравнения (свободные члены уменьшены в 10 раз):

$$\begin{aligned} -0,195\,3671 \Delta X_{12} - 0,507\,537 \Delta Y_{12} + 0,839\,1889 \Delta Z_{12} &= 0,265\,6593. \\ +0,487\,6776 \Delta X_{12} - 0,039\,1048 \Delta Y_{12} + 0,872\,1475 \Delta Z_{12} &= -0,055\,0494. \\ +0,449\,9433 \Delta X_{12} - 0,599\,9974 \Delta Y_{12} + 0,661\,4788 \Delta Z_{12} &= 0,099\,9834. \end{aligned}$$

Результаты решения.

$$\begin{aligned} \Delta Z_{12} &= +78490; \quad \Delta Y_{12} = -287296; \quad \Delta X_{12} = 276287 \text{ м.} \\ d_{12} &= 406244 \text{ м; } \Psi_{12} = 11^\circ 08' 24'' ,42; \quad \Delta_{12} = 226^\circ 07' 08'' ,67 \end{aligned}$$

По геодезическим данным $\Delta Z_{12} = 78490$, $\Delta Y_{12} = -287297$, $\Delta X_{12} = -276287$ м.

Такой способ вычислений сокращает как продолжительность наблюдений, так и время их обработки и дает полную информацию о хорде. В случае необходимости следует применять уравновешивание. Вычисления на моделях подтвердили эффективность предлагаемого метода.

Очевидно нужно избегать случаев, когда матрица коэффициентов будет вырожденной, а это возможно, когда направления на квазар образуют узкий пучок. В идеальном случае направления на квазары должны быть ортогональны.

Подобный же способ обработки можно применять и к измерениям частот, которые дают «ширину фронта» импульсов, то есть проекцию базы на линию, перпендикулярную направлению на квазар.

Аналогичным образом можно использовать лазерные измерения расстояний до Луны, но в этом случае требуются точные координаты отражателей, установленных на Луне, и обработка значительно усложняется [9].

Перспективы радиointерферометрии. Радиointерферометры с независимой регистрацией сигналов стали уже реальностью. С их помощью в 1963 г. были проведены совместные советско-американские эксперименты по изучению на волнах 6 и 26 см природы радиисточников [3]. При базе радиointерферометра 8030 км (22-метровый радиотелескоп Крымской обсерватории и 42-метровый телескоп национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бенк) было получено угловое разрешение в $0'',0002$.

Выполнены также первые геодезические эксперименты. Канадские астрономы в 1968 г. определили длину базы (Алгонкин, Онтарио—Принц Альберт, Саскачеван) в 2143 км с ошибкой по внутренней сходимости ± 20 м. Сравнение с результатами наземных геодезических измерений дало расхождение в 30 м, вероятно, за счет ионосферной рефракции, так как использовались волны длиной 67 см. В США в 1969 г. на радиointерферометре с базой 845 км выполнили две серии измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Средние квадратические ошибки определения длины базы по внутренней сходимости получились $\pm 0,5$ и $\pm 0,3$ м. Полученные длины базы разли-

чались между собой на 1,3 м и от геодезического значения на 2,4 и 1,1 м [3].

Таким образом, уже сейчас расстояния в сотни километров измеряются точнее, чем в геодезии, а в будущем точность еще повысится. Этим методом можно очень точно определять изменения расстояний между пунктами, то есть измерять дрейфы континентов, сдвиги и приливы в земной коре, колебания полюса и т. д.

Этот метод позволяет синхронизировать время в масштабах всей Земли с точностью $1 \cdot 10^{-9}$ и сверять стандарты частоты с точностью до долей миллигерца. При этом не нужно перевозить часы или другие приборы. Достаточно определить с помощью ЭВМ момент совпадения записи путем получения интерференционного сигнала с различными сдвигами по времени. Максимальный сигнал будет соответствовать моменту совпадения записей по времени. Расхождение между расчетным и измеренным временем и даст поправку часов.

Чем шире полоса регистрации сигналов (полоса корреляции), тем точнее можно определить разность времени на двух пунктах. Преобразуя сигнал с помощью нескольких импульсов гетеродина, имеющих разные частоты, можно сделать полосу приема очень широкой и повысить точность сверки, но не чувствительность, которая не зависит от полосы регистрации.

Аналогично определяют частоты атомных стандартов. Если частоты генераторов точно совпадают, то частота интерферометра будет соответствовать расчетной, а если не совпадают, то отличаться от нее на постоянную величину, по которой можно рассчитать разность частот.

Этим методом можно точно определять длительность суток и их изменения, то есть неравномерность вращения Земли, коротко периодические изменения во времени направления оси вращения Земли и т. д.

Дифференциальный радиоинтерференционный метод уже используется для проверки теории относительности. Так радиодистанция ЗС-271 имеет минимальное угловое расстояние от диска Солнца 1° , а ЗС-273 в это же время расстояние в 10° . При приближении к Солнцу угловое расстояние между ними должно уменьшаться. 2—10 октября 1967 г. ученые из Калифорнийского технологического института получили релятивистское отклонение луча света $1''.82 \pm 0''.20$ (при расчетном $1''.75$), что гораздо точнее, чем величина, получаемая из наблюдений солнечных затмений ($2''.2$).

Этот метод успешно использовался 21 апреля 1972 г. во время экспедиции «Аполлон-16». Положение лунохода «Луный скиталец» регистрировалось на его трассе в 4 км с точностью до 1 м с трех станций (вблизи Мадрида, на острове Вознесения и мысе Кеннеди). Запустив в атмосферу Венеры несколько шаров зондов, этим методом можно будет исследовать в ней ветры [5].

Проф. И. Д. Жонголович [3] считает весьма целесообразным сочетать методы спутниковой геодезии и метод радиоинтерферометра с длинной базой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берк Б. Интерферометры с большими базами. — «УФН», 1970, т. 101, вып. 3.
2. Дубинский Б. А., Слыш В. И. Радиоастрономия. М., «Советское радио», 1973.
3. Жонголович И. Д. Совместное использование синхронных фотографических и лазерных наблюдений ИСЗ и наблюдений радиоинтерферометром с длинной базой. — В сб.: Наблюдения ИСЗ, № 12. Прага, 1973.
4. Изотов А. А. и др. Основы спутниковой геодезии. М., «Недра», 1974.
5. Матвеев Л. И. Радиоинтерферометры. М., «Знание», 1974.
6. Троицкий В. С. Радиоастрономический метод измерения расстояний между континентами и сверки часов. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1970, вып. 1.
7. Brotten N. W. et al. Long base line interferometry, a new technique. — «Science», vol. 156, 1967, June.
8. Jones H. E. Geodetic Ties between Continents by Means of Radio Telescopes. — «Canadian Surveyor», 1969, № 4.
9. Rehse H. Die orthogonaltriangulation. — «Vermess. techn.», 1972, № 8.

Работа поступила в редколлегию 14 февраля 1975 года. Рекомендована кафедрой высшей геодезии и астрономии Львовского политехнического института.