

УДК 523.164 : 621.396

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АСТРОМЕТРИИ, ГЕО- И ПЛАНЕТОДИНАМИКИ, ГЕОДЕЗИИ, СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ

(Обзор)

В. А. Алексеев

1. Семидесятые годы нашего столетия явились годами становления в астрометрии нового направления — радиоастрометрии, основными инструментами которой являются радиоинтерферометры с большими и сверхбольшими базами. Причем, для астрометрии, базирующейся до этого времени на позиционных оптических наблюдениях, это дало не только освоение нового участка спектра электромагнитного излучения космических объектов — радиочастотного, но и новые методические приемы и новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований (см., например, [1]). Положительную роль здесь сыграл тот факт, что разработчиками радиоастрометрического направления оказались не астрометристы, а радиоастрономы, сумевшие первыми увидеть исключительные возможности созданной ими новой техники радиоастрономических исследований — радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) — в решении задач фундаментальной и прикладной астрометрии. Для этих задач оказалось весьма удачным сочетание свойств электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне и параметров земной атмосферы и космической среды, а также наличие сверхкомпактных космических радиоисточников с достаточной интенсивностью излучения.

Благодаря радиопрозрачности космической среды и атмосферы Земли на частотах $f \leq 10^{10}$ Гц оказывается возможным наблюдать в радиодиапазоне объекты, удаленные на «край» Вселенной, практически вне зависимости от погодных условий, что обеспечивает существенное преимущество радиоастрометрии перед оптической — возможность проведения непрерывных измерений. При этом удаленность наблюдаемых космических объектов делает их идеальными реперами невращающейся фундаментальной системы координат — основы всех астрометрических исследований, а наличие среди них активных радиогалактик и квазаров с относительно большой мощностью излучения от компонент с малыми угловыми размерами делает возможным их наблюдения с помощью хотя и достаточно дорогих, но вполне реализуемых РСДБ-средств.

Конечно, как и для других участков спектра электромагнитных волн, в радиочастотном диапазоне на точность измерений оказывают влияние неоднородности атмосферы Земли и космической среды. Причем в радиодиапазоне это влияние даже сильнее, чем в оптическом: здесь существенную роль играет так называемая «влажная» компонента атмосферы, связанная с наличием в ней водяного пара, а в длинноволновой части ее дополняют еще ионизированная часть — ионосфера —

и межпланетная среда. Но, хотя влияние ионосферы и межпланетной среды, обладающих частотно-дисперсионными характеристиками, и может быть прямо измерено путем приема на разнесенных частотах, а влияние «влажной» компоненты атмосферы определено по радиотеплолокационным измерениям яркостной температуры атмосферы в линии излучения водяного пара, даже без этих измерений влияние атмосферы Земли и космической среды приводит на волнах сантиметрового диапазона в эквивалентном рефракционном исчислении к ошибке $\sim 0,01$ угл. с в абсолютных координатных РСДБ-измерениях и менее $0,001$ угл. с — в дифференциальных, если измерения проводить на базе $5\text{--}6$ тыс. км, существенно превышающей масштабы указанных неоднородностей. Важно, что и для таких баз многие удаленные космические радиоисточники остаются «точечными», т. е. излучение от них, принимаемое в разнесенных пунктах, остается взаимно-когерентным, что необходимо для получения соответствующего интерференционного отклика. Именно эти обстоятельства обеспечивают применимость радиоинтерферометров со сверхдлинными базами в решении радиоастрометрических задач и их приложений с точностями, более чем на порядок превышающими точность традиционных средств оптической астрометрии.

2. Первичной информативной основой при решении астрономических задач с использованием радиоинтерферометров являются измеряемые в процессе интерферометрической обработки взаимное запаздывание $\tau'(t)$ принятого в различных пунктах излучения наблюдаемого точечного космического радиоисточника (квара, радиогалактики) и частота интерференции $F'(t)$, соответствующая скорости изменения запаздывания $\tau'(t)$, отнесенной к частоте приема f_0 : $F'(t) = f_0 d\tau'(t)/dt$. В этом плане в астрометрических применениях радиоинтерферометр удобно рассматривать как совмещенный разностно-дальномерный и дифференциально-доплеровский инструмент. При этом для интерферометра с синхронными приемными системами определяемая разность дальности $\rho(t) = c\tau'(t)$ от наблюдаемого удаленного стационарного радиоисточника до пунктов интерферометра, скорректированная на абберацию и эквивалентную рефракцию, является проекцией закрепленного ими вектора базы $\mathbf{b}(t)$ на вектор положения этого источника $\mathbf{s}$:

$$\rho(t) = (\mathbf{b}(t) \mathbf{s}),$$

а частота интерференции определяет дифференциальный доплеровский сдвиг частоты принимаемых в разнесенных пунктах сигналов, вызванный вращением базы интерферометра (земной хорды) относительно наблюдаемого источника:

$$F(t) = (f_0/c)[\mathbf{\Omega} \mathbf{b}]_t \mathbf{s},$$

где $\mathbf{\Omega}_t$ — мгновенный вектор вращения базы. Последующее определение параметров векторов $\mathbf{b}_t$, $\mathbf{s}$, $\mathbf{\Omega}_t$ и составляет предмет радиоастрометрии в целях установления небесной и земной систем координат и их взаимной связи, геодинамических, геофизических и других приложений. При этом номинальная (без учета геометрических факторов) разрешающая способность радиоинтерферометра будет по измерениям задержки $\tau(t)$ в угловой мере $\sigma\theta \simeq c\sigma\tau/b$ рад и в линейной мере $\sigma L = c\sigma\tau$, в частности, при $\sigma\tau = 10^{-10}$ с (см. ниже) на базе в 6 тыс. км получаем $\sigma\theta \approx 10^{-3}$ угл. с и $\sigma L \approx 3$ км.

В радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ), реализуемых в настоящее время с использованием систем независимого приема [2], принимаемое в разнесенных пунктах излучение космического радиоисточника фиксируется в местных шкалах времени на магнитную ленту. (Благодаря этому в интерферометре отсутствуют физические

системы связи между пунктами приема и пунктом обработки; поэтому пункты интерферометра можно разнести на произвольно большие расстояния, вплоть до выноса их в космос.) При этом измеряемая в процессе совместной обработки записанных сигналов величина их взаимного запаздывания $\tau(t)$ включает кроме геометрической части $\tau'(t)$ инструментальную задержку из-за несинхронности шкал времени $\Delta\tau_{ш}(t)$ в пунктах приема и электрической несимметрии приемных трактов $\Delta\tau_{пр}(t)$:

$$\tau(t) = \tau'(t) + \Delta\tau_{ш}(t) + \Delta\tau_{пр}(t),$$

а частота интерференции определяется не только вращением базы, но и скоростью расхождения шкал времени на момент измерений: $F(t) = F'(t) + f_0 d(\Delta\tau_{ш}(t))/dt$. «Чистую» астрометрическую информацию с использованием РСДБ с системами независимого приема можно получить, если одновременно (или в близкие моменты времени) наблюдать два радиосточника и формировать дифференциальные величины

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \tau_i(t) - \tau_j(t) = (1/c)(b(t)(s_i - s_j))$$

и

$$\Delta F_{ij}/f_0 = (d/c dt)(b(t)(s_i - s_j)),$$

где индексы « i » и « j » соответствуют разным источникам.

Определение параметров векторов s_i и векторов b в закрепленной векторами s_i системе небесных координат возможно динамическим методом, основываясь на задании функциональной зависимости величин $\Delta\tau_{ij}(t)$ и $\Delta F_{ij}(t)$ от времени и наблюдая такую группу источников, чтобы число независимых уравнений для различных отсчетов функций $\Delta\tau_{ij}(t_k)$ и $\Delta F_{ij}(t_k)$ обеспечивало разрешимость соответствующей системы относительно неизвестных параметров векторов

$$(s_i - s_j), \quad b(t_k) \quad \text{и} \quad \Omega(t_k).$$

Как показано в [3], решение астрометрической задачи в приведенном выше смысле достигается по результатам дифференциальных интерферометрических наблюдений минимальной группы из пяти радиосточников, причем при представлении движения вектора базы $b(t)$ в системе наблюдаемых радиосточников равномерным вращением достаточно их наблюдений в четырех часовых углах, рассредоточенных в интервале совместной видимости из пунктов интерферометра. При этом в системе «среднего» на интервале наблюдений экватора Земли будут получены величины склонений δ_i наблюдаемых источников, разности их прямых восхождений $\alpha_i - \alpha_j$, полярная $b \cos \delta_b$ и экваториальная $b \sin \delta_b$ проекции базы, скорость вращения базы Ω и ее начальная фаза $\alpha_i - \alpha_b(t_0)$. Здесь α_b и δ_b — прямое восхождение и склонение вектора базы. Дополнительное использование результатов измерений абсолютных задержек $\tau_i(t_k)$ позволяет также определить рассинхронизацию шкал времени $\Delta\tau_{ш}(t_k)$, если задержки сигналов в трактах интерферометра измерены прямыми методами.

Динамическое определение координат космических радиосточников и параметров базы радиointерферометров совместно с определением рассинхронизации шкал времени в его пунктах можно получить по наблюдениям всего трех радиосточников* по результатам измерений абсолютных значений $\tau_i(t)$ и $F_i(t)$, если эти величины описать моделирующими функциями, включающими описания составляющих $\Delta\tau_{ш}(t)$ и $d(\Delta\tau_{ш}(t))/dt$ теми или иными функциями с ограниченным числом параметров [4]. Такой метод РСДБ-измерений можно назвать абсолют-

* Уменьшение числа объектов в одной наблюдательной программе существенно для ее оптимизации в целях повышения точности решения путем соответствующего выбора этих объектов.

ным. Однако точность этого метода определяется точностью модельного представления хода шкал времени внутри конкретной реализации, а сильная корреляция медленных уходов шкал времени с вариациями скорости вращения Земли, движением полюсов, приливными явлениями и другими столь же медленными процессами делает невозможным их разделение и, соответственно, ограничивает применение абсолютного метода в измерении этих величин.

Точность динамического метода решения задач астрометрии с применением РСДБ ограничивается величинами, в пределах которых сохраняется состоятельность принятой модели динамики системы: база интерферометра — наблюдаемые радиосточники. По имеющимся эвристическим оценкам эти величины составляют $\sim 0'',01$ в угловой мере и, соответственно, ~ 30 см — линейной [5]. Однако следует учитывать, что модель этой динамики может быть задана не на основе априорных предположений, а на прямых результатах интерферометрических измерений путем анализа переменной части функций $\Delta t_{ij}(t)$ или $\Delta F_{ij}(t)$ [6]. Существенно, что для этого не нужно точно знать координаты наблюдаемых источников и линейные размеры базы, т. е. решение этой динамической задачи свободное от ошибок собственно астрометрических определений. В целом, это, с одной стороны, может улучшить приведенные выше оценки предельной точности динамического решения астрометрических задач с применением РСДБ, с другой — показывает новые качества РСДБ-службы вращения Земли. Действительно, формально все параметры вращения Земли, точнее, ее элемента, закрепленного интерферометрическими пунктами, можно определить с помощью трехпунктового интерферометра по непрерывным наблюдениям двух незаходящих источников [7] без определения их координат. Классические же методы позиционной астрометрии с применением оптических средств могут дать адекватные по составу данные лишь при включении в наблюдательную программу очень большого числа звезд, координаты которых для исследования короткопериодических (внутрисуточных) вариаций вращения Земли должны быть точно известны.

Радиоинтерферометрические измерения позволяют получить также геометрическое решение задачи установления небесной и земной систем координат и их взаимной связи. При использовании N -базового радиоинтерферометрического комплекса и наблюдениях M космических радиосточников можно сформировать $(4N+3M-12)$ функционально независимых уравнений для измеренного взаимного запаздывания интерферируемых сигналов, в то время как система интерферометра и наблюдаемых источников описывается с точностью до трехмерного вращения $(4N+2M-3)$ параметрами (размеры и углы ориентации баз, величины рассинхронизаций местных шкал времени и угловые координаты источников). Следовательно, для разрешимости интересующей нас задачи необходимо выполнение неравенств $N \geq 3$ и $M \geq 9$, если ограничиться измерениями только задержек τ_{nm} интерферируемых сигналов. При этом измерения можно проводить с помощью двухэлементного радиоинтерферометра, синтезируя требуемое число баз $N \geq 3$ за счет вращения Земли. Если же совместно проводить и измерения частот интерференции F_{nm} , то число наблюдаемых источников можно уменьшить до пяти; здесь частотные измерения позволяют симмитировать фиктивные источники, задаваемые векторами $\mathbf{s}' = [s\Omega]$.

Метод геометрического решения задачи установления системы небесных координат с применением длиннобазового радиоинтерферометра с системами независимого приема был предложен в [8] под названием «метода дуг» и далее развит в [9]. Однако его реализация затруднительна из-за необходимости квазисовременного наблюдения достаточно большого числа источников — минимум девяти — при измерениях τ и минимум пяти — при измерениях τ и F .

Большие возможности в реализации как динамического, так и геометрического методов установления небесной и земной систем координат и их взаимной связи открываются с использованием РСДБ «второго поколения» с приемными системами, синхронизованными путем двусторонней связи через ИСЗ [10]. Применение ИСЗ-ретранслятора в системе РСДБ позволит, кроме этого, проводить передачу информации из пунктов приема в пункт обработки и тем самым обеспечить его работу в реальном масштабе времени.

При решении астрометрических задач динамическим методом с применением РСДБ с синхронизированными шкалами времени в его пунктах приема достаточная информация получается уже по наблюдениям двух радиоисточников. При этом для установления закона вращения базы интерферометра относительно наблюдаемых источников целесообразно, как и выше, использовать метод дифференциальной интерферометрии, который позволяет не только исключить ошибки из-за несимметрии плеч интерферометра, но и ослабить влияние атмосферы [3]. В итоге могут быть определены в системе среднего на интервале наблюдений экватора Земли склонения наблюдаемых источников, разность их прямых восхождений и, соответственно, дуга между ними, а также параметры базы интерферометра и ее вращения.

Геометрическое решение задачи задания реперов небесной системы координат и положения в этой системе координат геодезических базисов, закрепленных взаимно синхронизированными радиоинтерферометрическими пунктами, достигается по наблюдениям из трех пунктов трех радиоисточников с измерениями задержек τ интерферируемых сигналов и частот интерференции F [11]. В этом случае система РСДБ-комплекс — наблюдаемые источники описывается всего десятью параметрами, и для ее решения весь сеанс наблюдений трех космических радиоисточников может быть выполнен за 10—15 минут. В этом плане, вероятно, трехэлементный РСДБ-комплекс с синхронными шкалами времени является оптимальным для решения фундаментальных радиоастрометрических задач в части установления небесной и земной систем координат и оперативного определения их взаимной ориентации.

Применение радиоинтерферометрии космических объектов открывает новые возможности и в решении ряда проблем смежных наук. Так становится физически реализуемой идея М. С. Молоденского о задании формы Земли ее хордами путем закрепления концов этих хорд радиоинтерферометрическими пунктами. Применяя в том или ином объеме приведенный выше арсенал методических приемов, можно определить размеры этих хорд и их ориентацию в невращающейся системе небесных координат, закрепленной удаленными космическими радиоисточниками. При этом осредненные по всем хордам элементы их вращения будут задавать вращение Земли в целом, а индивидуальные отклонения от среднего, выходящие за ошибки измерений, будут определять динамику отдельных регионов.

Весьма эффективным представляется также применение радиоинтерферометрических методов для взаимного перемещения точек земной поверхности в целях геодинамических исследований. Очевидно, что в общем случае взаимное положение интерферометрических пунктов может быть задано в четырехмерном пространстве тремя линейными величинами и величиной рассинхронизации местных шкал времени. Их определение может быть выполнено по наблюдениям четырех космических радиоисточников с известными координатами, что предполагает предварительное установление небесной системы координат. Однако для определения взаимного перемещения точек земной поверхности достаточно приближенного знания координат космических радиоисточников и предположения их длительной стационарности, что обеспечивается их удаленностью. Ошибка в определении начального взаимного

положения наземных пунктов может последовательно уменьшаться при соответствующем повышении точности установления небесной системы координат.

Не акцентируя внимания на множестве прикладных радиоастрометрических применений РСДБ в интересах геодезии, океанографии, сейсмологии и т. п., базирующихся, в основном, на возможности высоко-точной пространственно-временной взаимной привязки разнесенных пунктов, остановимся несколько на возможностях интерферометрии искусственных космических объектов, оснащенных радиомаяками. Дело в том, что радиоинтерферометрический комплекс с базами глобальных масштабов обладает свойствами трехмерности измерений даже на космических расстояниях. Четырехэлементный комплекс с определенными в небесной системе координат методом радиоастрометрии базами и синхронизированными шкалами времени имеет номинальную разрешающую способность по углу $\sigma\theta \approx \sigma\sigma_t/B$ рад и по дальности $\sigma R \approx \approx (R/B)^2 \sigma\sigma_t$, где B — размер апертуры комплекса и $\sigma\sigma_t$ — погрешность измерения взаимного запаздывания принятых в разнесенных пунктах сигналов космического радиомаяка. При величине $\sigma\sigma_t = 10^{-10}$ с и $B = 10^4$ км разрешение по дальности на расстоянии Луны составит величину $\sigma R \approx 50$ м, а на орбите ИСЗ с высотой $H \approx 10$ тыс. км погрешность определения положения ИСЗ относительно наземного комплекса будет составлять ~ 10 см как в трансверсальном, так и в радиальном направлениях.

Представляется возможным, проводя из многих пунктов, распределенных по земному шару, радиоинтерферометрические наблюдения естественных космических радиоисточников и излучающих ИСЗ, построить единую систему геодезических координат и привязать ее к центру масс Земли, а также осуществить взаимную привязку оптической и радиосистем небесных координат, если одновременно определить координаты ИСЗ относительно опорных звезд [12] — в дополнение к известному способу установления связи этих координатных систем с помощью отождествленных объектов [13].

Установление радиомаяков на АМС или на спускаемых на поверхность планет аппаратах делает возможным использование РСДБ для планетодинамических исследований.

3. Точность радиоинтерферометрических методов в решении задач астрометрии определяется, как уже отмечалось, не только инструментальной погрешностью, но и влиянием атмосферы Земли. При этом важно представлять, что на точность интерферометрических измерений влияет не искривление фронта волны принимаемого излучения на неоднородностях атмосферы, которое для однопунктовых систем в радиодиапазоне может давать на больших зенитных расстояниях рефракционную ошибку в несколько десятков минут, а дополнительный взаимный набег в атмосфере пути сигналов от наблюдаемого источника до разнесенных антенн интерферометра, точнее — его неучитываемая часть. Существенно, что вся электрическая толща атмосферы в сантиметровом диапазоне волн составляет величину $\sim 2,5$ м, причем ее флуктуирующая часть оценивается величиной ~ 10 см [14], а регулярная составляющая с точностью до (1—2) см оценивается по приземным значениям температуры, давления и влажности [15]. Поэтому, если наблюдения источников проводить на зенитных расстояниях не более 75° , то эквивалентная рефракционная ошибка на базе в 6 тыс. км в координатных измерениях будет оцениваться величиной $\sigma\theta \sim 0,01$ угл. с. В дифференциальных интерферометрических измерениях ошибка будет еще меньше за счет «фильтрации» влияния неоднородностей с угловыми размерами больше, чем угловое расстояние между наблюдаемыми радиоисточниками. Кроме того, в настоящее время разработаны методы и средства

измерения температуры, давления и влажности атмосферы как в интегральном выражении, так и с восстановлением их профилей вдоль луча зрения по радиометрическим измерениям радиотеплового излучения атмосферы [16]. Именно эти параметры определяют электрическую толщину атмосферы, поэтому проведение этих измерений одновременно с радиоинтерферометрическими позволит учесть набег интерферируемых сигналов в атмосфере Земли с полной погрешностью $\sim (2-3)$ см и соответственно еще более повысить потенциальную точность радиоинтерферометрических методов [17]. Что касается инструментальной погрешности измерений, то уже в настоящее время она может быть доведена до величины 1—3 см при достаточном энергетическом потенциале используемых средств.

Расчеты показывают, что при оптимальной наблюдательной программе, обеспечивающей наилучшую обусловленность системы уравнений для решения комплексной задачи определения координат космических радионисточников и в их системе параметров базы интерферометра и рассинхронизации шкал времени в его пунктах, ошибка измерений приводит к ошибкам $\sim 10 \text{ с ст}/B$ и 10 с ст в единичном определении угловых и линейных величин соответственно. В задаче пространственно-временной привязки разнесенных пунктов, решаемой в установленной ранее системе небесных координат, оценки случайных ошибок определения линейных (B) и временных (Δt) величин имеют значения $\sigma B \sim 3 \text{ с ст}$ и $\sigma(\Delta t) \sim 3 \text{ ст}$.

Современные достижения радиоастрометрии достаточно полно иллюстрируются результатами использования РСДБ в первой наблюдательной программе MERIT, которая была организована с целью изучения и практического сопоставления различных средств измерения параметров вращения Земли [18]. По данным РСДБ-наблюдений космических радионисточников были определены координаты полюса с точностью $\sim 0,001$ угл. с или ~ 3 см в линейной мере и всемирное время UT_1 с точностью $\sim 0,07$ мс за суточный цикл измерений; длины десяти интерферометрических баз пятиэлементного комплекса за тот же интервал времени определены с погрешностью ± 2 см для $B \leq 5$ тыс. км и с погрешностью ± 5 см для $B \approx 8$ тыс. км. Координаты наблюдаемых радионисточников определены с точностью в тысячные доли угловых секунд. Заметим, что этим наблюдениям предшествовали исследования угловой структуры радионисточников со сверхвысоким угловым разрешением. Именно со структурой сверхкомпактных космических радионисточников и ее изменениями связывается конечная точность установления фундаментальной системы небесных координат и ее стабильность.

4. В заключение нам представляется целесообразным сделать некоторое отступление, касающееся применения терминов «сверхвысокое разрешение» и «сверхдлинная база».

Как известно, технические трудности выполнения требования соответствия действительной и теоретической геометрии поверхности зеркала радиотелескопа с ошибкой не более $10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-2} \lambda$ ограничивают размер D и соответственно угловое разрешение $\Delta \theta = \lambda/D$ радиотелескопов со сплошным зеркалом. Эмпирически для сантиметрового диапазона радиональный предельный размер радиотелескопа с параболическим полностьюотным зеркалом оценивается величиной $D_{\max} \approx 100$ м, соответствующее ординарное угловое разрешение таких радиотелескопов (РТ) $\Delta \theta > 1$ угл. мин.

Принципы построения антенных решеток (АР) и классических систем апертурного синтеза (САС) позволяют обойти указанное выше техническое ограничение на размер B апертуры и ее угловое разрешение

λ/B . Ограничивающим фактором здесь считается необходимость обеспечения фазирования элементов АР или САС с ошибкой не более $0,1 - 0,3 \text{ рад}$. При этом необходимо учитывать не только нестабильность электрических длин линий связи между элементами, но и возможное различие атмосферных фазовых набегов падающего излучения на трассах источник — разнесенные элементы решетки или апертурного синтеза. Поэтому разработка методов (см., например [19]) исключения нестабильности линий связи на точность определения взаимной фазы сигналов, принятых в разнесенных пунктах, не снижает внешнего ограничения на размеры апертуры АР или САС, связанного с неоднородностью атмосферы Земли. Для получения числовых оценок можно воспользоваться пространственной структурной функцией флуктуаций эйконала тропосферы [14], наложив стандартное условие $\sigma l \leq (10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-2}) \lambda$ и определив тем самым тропосферное ограничение на рабочий диапазон длин волн АР или САС:

$$\lambda(B) > (10 \div 20) \sigma l_{\text{троп}}(B).$$

С другой стороны, максимальная рабочая длина волны ограничивается ионосферными неоднородностями, дисперсия которых также зависит от их размеров [20]. Полагая, что дисперсия фазового набег сигнала в ионосфере $\sigma_{\text{ион}}$ пропорциональна дисперсии интегральной электронной концентрации ионосферы: $\sigma_{\text{ион}} \sim \lambda(\Delta N/N) \int N_i dl$, где N — электронная концентрация, l — элемент пути, для $\int N_i dl = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и условия $\sigma \leq 0,3 \text{ рад}$ получим $\lambda(B) \leq 0,1 (\Delta N/N)^{-1} \text{ см}$.

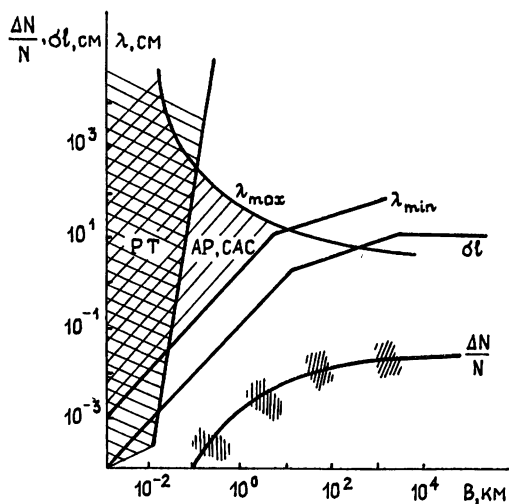


Рис. 1.

На рис. 1 приведены зависимости $\lambda_{\min}(B)$ и $\lambda_{\max}(B)$. Область $\lambda_{\min}(B) \leq \lambda(B) \leq \lambda_{\max}(B)$ определяет диапазон рабочих длин волн и размеров апертур, где применимы классические принципы построения АР и САС и их использования для получения радиоизображений наблюдаемых объектов в координатах, непосредственно связанных с параметрами используемой системы. Как следует из приведенных графиков, предельное угловое разрешение таких систем $\Delta \theta_{\min} = \lambda_{\min}/B \simeq 1 \text{ угл. с}$, такова же предельная точность «абсолютных» координат-

ных измерений этими системами. (На рис. 1 $\sigma l(B)$ — пространственная структурная функция эйконала тропосферы, $\Delta N/N$ — зависимость флуктуаций электронной концентрации, $\lambda_{\min}(B)$ — тропосферное ограничение на минимальную длину волны, $\lambda_{\max}(B)$ — ионосферное ограничение на максимальную длину волны.)

Вне указанной области можно говорить о получении «сверхвысокого разрешения», реализуемом лишь в задачах исследования угловой структуры космических радиоисточников и задания их положения относительно близких «опорных» объектов. При этом известные методы получения радиоизображений со сверхвысоким угловым разрешением, в том числе методы итеративного моделирования на основе интерфе-

рометрических данных при отсутствии фазовой информации или с использованием так называемой «фазы замыкания» и др., приближают нас к синтезу адаптивных систем со сверхбольшими апертурами, для которых реализуемое предельное разрешение будет уже определяться не только размерами апертуры, но и соотношением сигнала к шуму на выходе систем обработки принятых сигналов.

Термин «сверхвысокое разрешение» имеет смысловое содержание в астрофизических исследованиях, тогда как термину «сверхдлинная база» наиболее адекватно астрометрическое приложение. Действительно, точность координатных интерферометрических измерений прямо связана с ошибкой измерения взаимного запаздывания $\tau(t)$ сигналов, принятых в разнесенных пунктах от космического источника, отнесенной к базе—расстоянию между пунктами интерферометра. Анализируя пространственную структурную функцию эйконала тропосферы, которая и определяет внешнее ограничение на точность измерения $\tau(t)$, можно выделить диапазон длин баз $B \leq 10$ км, где величина $s \sigma_{\text{тр}}(t)/B$ постоянна и имеет значение $\sim 10^{-6}$, и диапазон $B \geq 10^3$ км, превышающих горизонтальный масштаб неоднородностей тропосферы Земли, и где $s \sigma_{\text{тр}}(t)/B \sim 1/B$. Именно эту область, по нашему мнению, можно считать областью «сверхдлинных баз», так как только в ней возможно достижение приводимых выше точностей, которые на один-два порядка выше точностей «ординара» при $B \leq 10$ км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тронцкий В. С., Алексеев В. А., Никонов В. Н. — УФН, 1975, 117, вып. 2, с. 363.
2. Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шаломницкий Г. Б. — Изв. вузов — Радиофизика, 1965, 8, № 4, с. 651.
3. Алексеев В. А., Липатов Б. Н., Щекотов Б. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 1, с. 1669.
4. Cohen M., Shaffer D. — Astron. J., 1971, 76, p. 91.
5. Дравских А. Ф., Финкельштейн А. М. — В сб.: Геодинамика и астрометрия. — Киев: Наукова думка, 1980, с. 137.
6. Алексеев В. А. В кн.: Астрометрические исследования. — Киев: Наукова думка, 1981, с. 75.
7. Алексеев В. А., Липатов Б. Н., Сизов А. С. В кн.: Задачи современной астрометрии в создании инерциальной системы координат. — Ташкент: ФАН, 1981, с. 253.
8. Дравских А. Ф., Красинский Г. А., Финкельштейн А. М. — Письма в Астрон. журн., 1975, 1, № 5, с. 43.
9. Дравских А. Ф., Кошелева О. М., Крейнович В. Я., Финкельштейн А. М. — Письма в Астрон. журн., 1979, 5, № 6, с. 300.
10. Алексеев В. А., Брауде С. Я. и др. Проект «Полигам». Сообщения САО, 1980, вып. 27—30.
11. Алексеев В. А., Антонец М. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 25, № 5, с. 485.
12. Алексеев В. А., Липатов Б. Н. В кн.: Задачи современной астрометрии в создании инерциальной системы координат. — Ташкент: ФАН, 1981, с. 312.
13. Губанов В. С., Кумкова И. И. В кн.: Астрометрические исследования. — Киев: Наукова думка, 1981, с. 59.
14. Парийский Ю. Н., Стоцкий А. А. — Изв. ГАО АН СССР, 1972, № 188, с. 195.
15. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. — М.: Связь, 1969.
16. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1974.
17. Алексеев В. А., Гайкович К. П., Наумов А. П. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1981, с. 80.
18. Яцкив Я. С. Препринт ИТФ-81-124Р — Киев, 1981.
19. Алексеев В. А., Кротиков В. Д. Авторское свидетельство № 258454. — Бюл. изобрет., 1970, № 1, с. 65.
20. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1968, 11, № 2, с. 169.