

2.7. Навигационные характеристики спутников

К основным навигационным характеристикам НКА относятся:

- зона обзора
- зона видимости
- продолжительность наблюдения

Зоной обзора НКА называется участок земной поверхности, на котором можно принимать сигналы НКА и осуществлять за ним наблюдение. Центром зоны обзора является *географическое место спутника* – точка O_3 , расположенная в месте пересечения земной поверхности с линией, соединяющей центры масс Земли и НКА. При движении спутника по орбите на поверхности Земли образуется совокупность географических мест – *трасса* спутника. Очевидно, что трасса спутника не поднимается выше географической широты, равной i . Географическая широта и долгота точки O_3 могут быть найдены из выражений

$$\varphi = \arcsin(\sin u \sin i); \quad \lambda = \Omega - S_r + \arctg(\tg u \cos i) + \dot{\Omega} t, \quad (2.13)$$

где $\dot{\Omega} = \Delta\Omega / T$ – угловая скорость прецессии узла орбиты; S_r – гринвичское звездное время; i, u, Ω – параметры орбиты.

Размер зоны обзора характеризуется величиной угла и зависит от высоты H_A полета спутника, так как зона обзора ограничена линией истинного горизонта. Величина $\beta_{\max}$ может быть найдена из выражения $\beta_{\max} = \arccos [R_3 / (R_3 + H_A)]$.

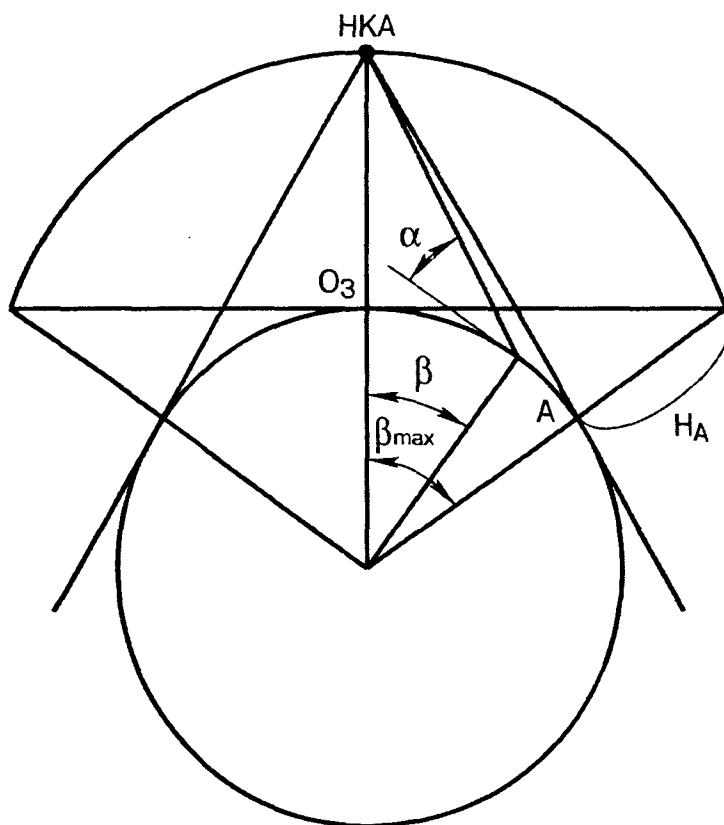


Рис. 2.7. Основные навигационные характеристики НКА

Существует понятие *радиогоризонта* – гипотетической линии горизонта, поднятой над линией истинного горизонта на угол маски $\alpha = 5 \dots 10^\circ$. Работоспособность СНС и соответствие ее характеристик техническим условиям гарантируется при наблюдении спутников, расположенных не ниже линии радиогоризонта. В этом случае зона обзора определяется углом $\beta < \beta_{\max}$, где

$$\beta = \arccos [R_3 \cos \alpha / (R_3 + H_A)] - \alpha. \quad (2.14)$$

Важными параметрами СНС являются *площадь обзора* $S_{\text{об}} = 2\pi R_3^2 (1 - \cos \beta_{\max})$ и *относительная площадь обзора* $S_{\text{об}} / S_3 = \sin^2(\beta_{\max}^2 / 2)$, где $S_3 = 4\pi R_3^2$ – площадь поверхности Земли. СНС ГЛОНАСС и GPS имеют следующие характеристики обзора: $\beta_{\max} \approx 75,52^\circ$, $S_{\text{об}} / S_3 \approx 30\%$, $H_A \approx 19100 \dots 20200$ км, $\alpha = 10^\circ$.

Перечисленные характеристики оптимальны для построения *широкозонных* СНС, так как дальнейшее увеличение высоты полета незначительно расширяет зону обзора, но существенно увеличивает затраты на формирование созвездия спутников.

В [2] иллюстрируется определение условий видимости НКА для наблюдателя, расположенного в точке O_3 , лежащей на трассе спутника (рис. 2.8). Область небосвода, в которой НКА наблюдается с момента восхода $\tau_{вх}$ над горизонтом, до момента захода $\tau_{вых}$, называется зоной видимости. Радиогоризонт находится выше истинного горизонта, поэтому угловой радиус зоны обзора уменьшается на величину α , как показано в (2.14). В данном случае угол α принято называть *минимально допустимой высотой* (радиогоризонта).

Продолжительность видимости НКА определяется разностью $t_{вид} = \tau_{вых} - \tau_{вх}$ и зависит от высоты полета, либо от периода обращения НКА. В случае круговой орбиты $t_{вид} = 2\beta/v = T\beta/\pi$, где $v = 2\pi/T$ – угловая скорость обращения спутника. Продолжительность видимости максимальна, если потребитель находится на трассе НКА (спутник проходит через зенит). Для системы ГЛОНАСС продолжительность видимости $t_{вид} \approx 300$ мин. Разумеется, если потребитель находится в стороне от трассы НКА, продолжительность видимости уменьшается. Приемник потребителя, как правило, принимает сигналы от нескольких НКА, расположенных в зоне видимости и использует алгоритм, позволяющий выбрать оптимальное сочетание НКА.

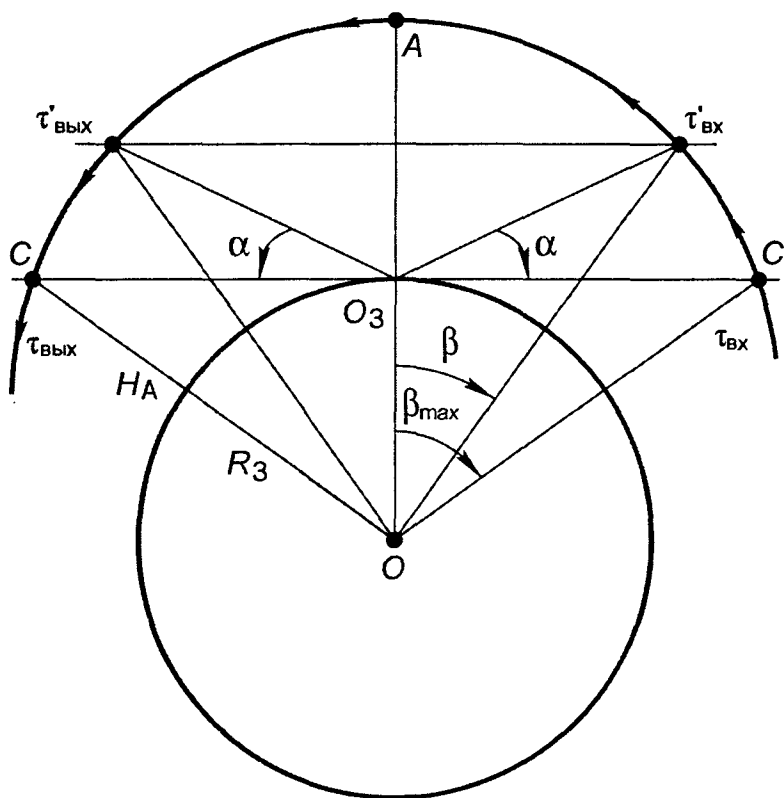


Рис. 2.8. Зона видимости спутника

2.8. Навигационные задачи и методы их решения

Навигационной задачей в СНС принято называть нахождение пространственно-временных координат потребителя и составляющих вектора его скорости, в совокупности называемых *вектором потребителя*. В результате решения навигационной задачи в общем случае должны быть найдены пространственные координаты потребителя (x, y, z), поправка t к шкале времени потребителя относительно шкалы времени СНС и составляющие вектора скорости как производные от координат потребителя во времени.

Потребитель имеет возможность измерять задержку сигнала и доплеровский сдвиг частоты (*радионавигационные параметры*), а также выделять из сигнала данные альманаха и эфемерид (*навигационное сообщение*). Геометрические параметры, которые соответствуют радионавигационным, принято называть *навигационными* параметрами. Так, задержке сигнала τ соответствует дальность $R = c\tau$, где c – скорость света; доплеровскому смещению частоты f_d соответствует радиальная скорость сближения $V_r = f_d\lambda$, где λ – длина волны излучаемого НКА сигнала. Функциональную связь между навигационными параметрами и вектором потребителя называют *навигационной функцией*. Конкретный вид функции определяется многими факторами: системой координат, характером движения потребителя и т.п.

В открытом пространстве геометрическое место точек с одинаковым значением R образует *поверхность положения* в виде сферы с радиусом R и центром, совпадающим с фазовым центром передающей антенны НКА. При пересечении двух поверхностей положения образуется *линия положения* – совокупность точек, имеющих два заданных значения навигационного параметра R . Пересечение двух сфер дает линию положения в виде окружности (рис. 2.9). *Местоположение* конкретной точки определяется по пересечению двух линий положения или, соответственно, трех поверхностей положения. В ряде случаев две линии положения могут пересекаться в двух точках (см. рис. 1.4), что порождает *неоднозначность местоположения*. Устранить неоднозначность можно лишь введением еще одной линии положения или дополнительной информации о местоположении.

2.8.1. Дальномерный метод

В большинстве применений СНС можно считать, что потребитель находится на поверхности Земли.

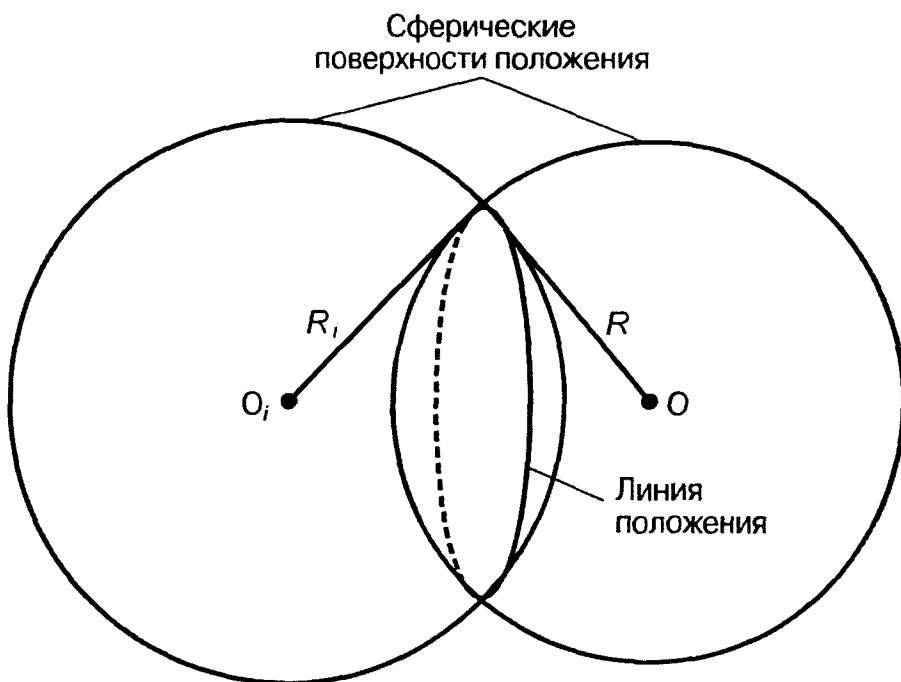


Рис. 2.9. Поверхности и линии положения

Условно примем форму Земли за идеальную сферическую. Тогда на рис. 2.9 сферу с радиусом R можно считать земной поверхностью с центром масс в точке O , а сферу с радиусом R_i поверхностью положения, образованной вокруг НКА с центром масс в точке O_i .

Уравнение сферы имеет вид:

$$R_i = \sqrt{[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]}, \quad (2.15)$$

где R_i – дальность между i -м НКА и потребителем; x_i, y_i, z_i – известные на момент измерения координаты НКА; x, y, z – координаты потребителя.

Пространственные координаты потребителя находят в точке пересечения трех поверхностей положения, описываемых уравнением (2.15). Для наземного потребителя линия положения в случае с одним НКА представляет собой окружность на поверхности Земли (рис. 2-9). В случае с двумя НКА наземный потребитель может находиться в одной из двух точек, образованных при пересечении двух окружностей. Возникает неоднозначность, которая может быть устранена знанием ориентировочных координат потребителя. Если ориентировочные координаты неизвестны, неоднозначность устраняется измерением дальности до третьего НКА. Таким образом,

для определения координат потребителя *на поверхности* Земли, при условии абсолютной неизвестности предварительных координат, необходимо измерение как минимум *трех* дальностей до НКА.

В общем случае, когда высота потребителя над поверхностью Земли неизвестна, земная поверхность не может быть принята за одну из поверхностей положения. Тогда в случае со знанием предварительных координат требуется измерение дальностей минимум до трех спутников; в случае с абсолютной неизвестностью предварительных координат необходимо измерение дальностей до *четырёх* спутников.

Если учесть, что некоторые спутники в разные моменты времени могут находиться близко к линии радиогоризонта, что чрезвычайно невыгодно с точки зрения приема радиосигнала и точности измерений, либо быть неисправны, то становится очевидной необходимость нахождения в зоне видимости потребителя как минимум 5-6 НКА, что и обуславливает существующую орбитальную структуру СНС. Меньшее количество видимых НКА снижает доступность, целостность и непрерывность навигационного поля СНС.

В дальномерном методе навигационная задача представляет собой систему уравнений (2.15), где количество уравнений определяется приведенными выше условиями. В уравнениях (2.15) неявно подразумевается, что все величины взяты в один момент времени, но координаты спутника определены в системной шкале времени, а задержки сигнала и координаты потребителя вычисляются в шкале времени потребителя. При расхождении шкал времени на величину Δt возникает погрешность измерения дальности $\Delta R = c\Delta t$, приводящая к возрастанию погрешности местоопределения. Приблизить синхронизацию шкал к идеальной можно при помощи использования потребителем эталона времени и частоты, периодически сверяемого с системной шкалой. На практике этот метод нереализуем для большей части потребителей из-за сложности и дороговизны оборудования и применяется лишь на некоторых контрольных и дифференциальных наземных станциях.

2.8.2. Псевдодальномерный метод

Расхождение шкал Δt на время проведения измерений можно считать постоянной величиной. Поэтому при измерении дальности до i -того НКА получают *псевдодальность* R'_i , отличающуюся от истинной дальности R_i на постоянную величину ΔR . Уравнение (2.15) для псевдодальности приобретает вид:

$$R'_i = \sqrt{[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]} + \Delta R. \quad (2.16)$$

Как и в дальномерном методе, поверхностью положения является сфера с центром в центре масс НКА, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину ΔR . Для определения координат потребителя необходимо решить задачу с четырьмя неизвестными ($x, y, z, \Delta R$). Следовательно, для решения системы уравнений в псевдодальномерном методе необходимо измерить псевдодальности минимум до четырех спутников. При этом по-прежнему возникает пространственная неоднозначность, которую стараются исключать при помощи априорного знания или предвычисления координат, в противном случае потребовалось бы измерение псевдодальностей до пяти НКА, что не всегда осуществимо на практике.

Жёсткие требования, предъявляемые псевдодальномерным методом к количеству наблюдаемых спутников, реализуются только в среднеорбитальных СНС. Низкоорбитальные СНС обеспечивают периодическую видимость 1 ... 2 НКА, поэтому определение координат потребителя в этих системах происходит не в реальном времени, а после проведения последовательных измерений нескольких линий положения по сигналам одного НКА [2].

Очевидно, что при нахождении постоянной погрешности $\Delta R = c\Delta t$ потребитель одновременно находит и величину расхождения Δt , что позволяет ему синхронизировать свою шкалу времени с системной. Благодаря этой возможности значительно упрощается аппаратура потребителя, что и обусловило преимущественное применение псевдодальномерного метода.

2.8.3. Разностно-дальномерный метод

Разностно-дальномерный метод основывается на измерении разности дальностей от потребителя до одного или нескольких НКА, и по сути своей аналогичен псевдодальномерному методу, поскольку в результатах измерения так же присутствует неизвестная постоянная величина ΔR .

Разностно-дальномерный метод использует три разности $\Delta R'_{ij} = R'_i - R'_j$ вычисленные для четырех спутников, так как в этом выражении величина ΔR , входящая в состав R'_i и R'_j , постоянная и уничтожается при вычитании. Следовательно, вычисление разностей псевдодальностей равносильно вычислению разностей истинных дальностей. В данном случае навигационным параметром является $\Delta R'_{ij}$, а поверхность положения представляет собой двуполост-

ной гиперboloид вращения, фокусами которого являются центры масс i -го и j -го НКА. Расстояние между фокусами называют базой.

Недостатком метода является невозможность определения смещения шкалы времени потребителя.

2.8.4. Прочие методы решения навигационной задачи

Кроме описанных методов решения навигационной задачи, существуют следующие методы:

- Радиально-скоростной (доплеровский).
- Псевдорадиально-скоростной.
- Разностно-радиально-скоростной.
- Комбинированный.

Радиально-скоростной метод основан на измерении трех радиальных скоростей перемещения НКА относительно потребителя. Физическую основу метода составляет зависимость радиальной скорости точки относительно НКА от координат и относительно скорости НКА. На практике для измерения радиальных скоростей используется доплеровское смещение, что порождает ряд недостатков. Во-первых, потребитель должен обладать высокостабильным эталоном частоты во избежание дополнительных погрешностей при измерении доплеровского сдвига; во-вторых, в среднеорбитальных СНС использование метода осложняется ввиду медленного изменения радиальной скорости. По этой причине в СНС GPS и ГЛОНАСС радиально-скоростной метод применяется только для определения составляющих скорости потребителя.

Псевдорадиально-скоростной метод позволяет определять вектор скорости потребителя при наличии неизвестного постоянного смещения частоты сигнала. Для определения вектора скорости потребителя требуется решить систему из четырех уравнений. В свою очередь, для решения системы уравнений необходимо знание дальностей R_i и координат (x, y, z) потребителя. Эта информация может быть получена из псевдодальномерных измерений.

Разностно-радиально-скоростной метод заключается в определении трех разностей $\Delta \dot{R}_{ij} = \dot{R}_i - \dot{R}_j$, где точкой обозначены производные от дальности по времени. Разности могут вычисляться относительно одного или различных НКА. Если предполагать, что смещение частоты определяется исключительно нестабильностью эталона потребителя и одинаково для всех НКА, то при вычислении разностей можно использовать и псевдорадиальные скорости, поскольку при вычитании смещение компенсируется. Достоинством

метода при определении составляющих скорости потребителя является его независимость от нестабильности эталонов частоты, а недостатком – невозможность определения этой нестабильности.

Комбинированные методы кроме СНС используют дополнительные измерители координат, имеющиеся у потребителя. Например, при наличии у потребителя измерителя высоты с удовлетворительными параметрами, можно исключить одно измерение дальностей до НКА. Можно также комбинировать способы измерения, например, вместо четырех измерений псевдодальностей до четырех НКА применить измерение двух псевдодальностей до двух НКА, но в разные моменты времени.

2.8.5. Определение пространственной ориентации объекта

Одной из важных задач, решаемых при помощи СНС, является определение пространственной ориентации протяженного объекта (морского судна, самолета, крылатой ракеты и т.п.) В общем случае объект является произвольно движущимся в трех измерениях и задача должна решаться в реальном времени. Рассмотрим один из методов решения задачи, позволяющий определять ориентацию объекта с точностью от долей до нескольких угловых минут.

В двух точках A и B объекта, расположенных на его концах, устанавливают приемники сигналов СНС (рис. 2.10). Положение линии AB относительно объекта фиксировано и однозначно соответствует положению объекта в пространстве. Положение линии AB относительно геоцентрической системы координат $OXYZ$ описывается направляющими косинусами $\cos \psi_x$, $\cos \psi_y$ и $\cos \psi_z$. Точка M расположена в середине базы AB .

Приемники A и B синхронно измеряют дальности R_{ai} и R_{bi} до i -го НКА с известными координатами (x_i, y_i, z_i) . Существует разность фаз сигналов, принимаемых в точках A и B :

$$\Delta\varphi_i = 2\pi(R_{ai} - R_{bi})/\lambda ,$$

где λ – длина волны излучаемого НКА сигнала. Разность фаз $\Delta\varphi_i$ связана с углом γ_i между линией AB и линией SM соотношением

$$\cos \gamma_i = \Delta\varphi_i \lambda / 2\pi d.$$

Кроме того, существует взаимосвязь между угловым параметром γ_i и направляющими косинусами, описываемая выражением

$$\cos \gamma_i = \mu_{xi} \cos \psi_x + \mu_{yi} \cos \psi_y + \mu_{zi} \cos \psi_z , \quad (2.17)$$

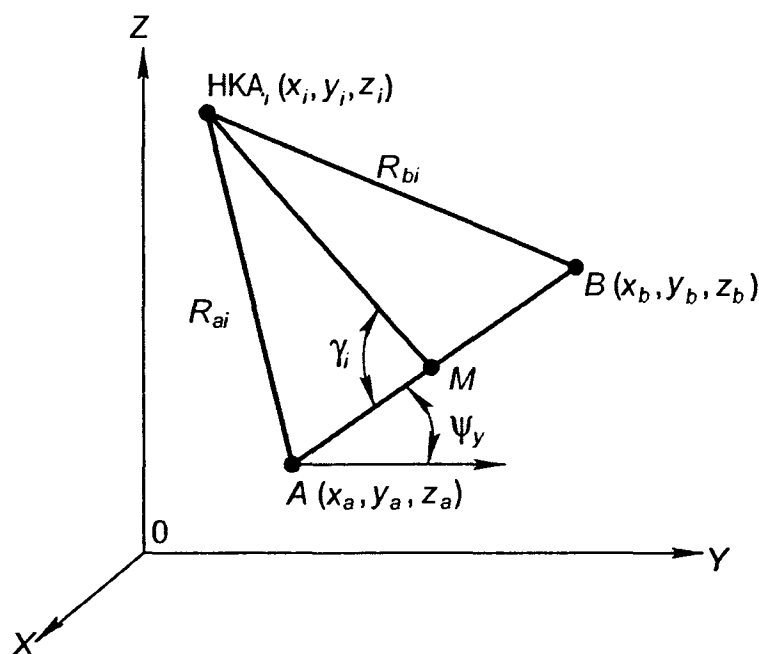


Рис. 2.10. Определение ориентации объекта в пространстве

где μ_{xi} , μ_{yi} , μ_{zi} – коэффициенты, определяемые через координаты НКА и точки М, которые могут быть вычислены на основе дальностей R_{ai} и R_{bi} .

Для нахождения трех неизвестных величин из выражения (2.17) необходимо решить систему из трех уравнений, проведя, как минимум, серию из трех измерений дальностей от точек А и В до трех НКА и определив соответствующие фазовые сдвиги.

Задачу можно упростить, используя так называемое уравнение связи

$$\cos^2 \psi_x + \cos^2 \psi_y + \cos^2 \psi_z = 1 \quad (2.18)$$

вместо одного из уравнений в системе, и определяя дальности только до двух НКА.