

УЧЕТ РЕЛЯТИВИСТСКИХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМЕ NAVSTAR

Пучков В. Ю., д. т. н. Шебшаевич В. С.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА РЕЛЯТИВИСТСКИХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Реализация высоких потенциальных точностей НВО по сигналам СРНС NAVSTAR [1—3] обусловила необходимость учета ряда дополнительных факторов, проявление которых в предшествующих системах навигации было незначительным. Одним из таких факторов является влияние релятивистских и гравитационных эффектов (РГЭ) на процессы, связанные с измерениями и числением времени и частоты на объектах, которые находятся в относительном движении в неоднородных гравитационных полях [4—20].

В целях обеспечения требуемой точности НВО в СРНС NAVSTAR предполагается использовать бортовые генераторы НИСЗ с суточной относительной нестабильностью порядка 10^{-13} , что позволит при периодичности закладки частотно-временной информации на борт НИСЗ три раза в сутки поддерживать СКП синхронизации БШВ сети НИСЗ на уровне, не превосходящем 10 нс. Текущие значения эфемерид НИСЗ системы NAVSTAR также будут характеризоваться высокой точностью: СКП трансверсальной и нормальной составляющих вектора положения КА — не более 10 м, радиальной — не более 1 м. Кроме того, имеется реальная возможность уменьшения погрешностей синхронизации БШВ и эфемерид НИСЗ при одновременном увеличении интервала времени между закладками подсистемой контроля и управления (КУ) соответствующей информации на борт НИСЗ [21].

Обработка в АП сигналов с Р-кодом позволит проводить измерения квазидальности и скорости изменения квазидальности с реально достижимыми СКП около 3 м и 1,5 см/с соответственно, что приведет к СКП определения пространственных координат не более 10 м, а составляющих вектора скорости не более 5 см/с. Среднеквадратическая погрешность определения времени при использовании стандартной АП составит 30 нс, при использовании же специальной аппаратуры приема временной информации — не более 10 нс. Погрешности относительных (дифференциальных) НВО будут

в несколько раз меньше. Расчетные значения ожидаемых СКП определения навигационных параметров в несколько раз ниже: квазидальности 0,2 м (при использовании дальномерного метода, основанного на измерении приращения фазы Р-кода) и 0,002 м (при использовании фазового метода, основанного на измерении фазы несущей), скорости изменения квазидальности 0,1 см/с. Все это говорит о высокой потенциальной точности НВО по сигналам СРНС NAVSTAR.

Необходимость учета РГЭ в СРНС NAVSTAR при обработке результатов измерений, формировании эфемеридной и частотно-временной информации обусловлена сравнимыми погрешностями за счет РГЭ с высокими точностными характеристиками НВО. Так, влияние РГЭ на скорость относительного ухода БШВ, формируемых бортовыми генераторами НИСЗ, и шкалы системного времени, формируемой опорным генератором одной из КА, оценивается величиной около 40 мкс в сутки, а амплитуда периодических колебаний БШВ НИСЗ, пропорциональная эксцентриситету e орбиты НИСЗ, — величиной до 46 нс (при $e=0,02$) [4—10]. По мнению ряда авторов [9, 10], учет РГЭ в СРНС NAVSTAR — одно из первых использований в практических целях аппарата общей теории относительности (ОТО) при описании процессов, связанных с течением времени и распространением электромагнитных сигналов.

2. ВЛИЯНИЕ РГЭ НА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Обзор основных РГЭ

Прогресс в экспериментальной проверке и практическом использовании результатов ОТО, а также в дальнейшем развитии этой теории в значительной степени связан с разработкой в начале 50-х годов и непрерывным совершенствованием технологии производства атомных стандартов времени и частоты (в дальнейшем называемых часами). Большой ряд экспериментов, проведенных за последние примерно 30 лет как в лабораторных

условиях, так и в околосреднем космическом пространстве, подтвердил с точностью до погрешностей измерений и обработки их результатов основные эффекты ОТО, связанные с измерениями и числением времени и частоты на объектах, которые находятся в относительном движении в неоднородных гравитационных полях. В результате этих экспериментов была обоснована необходимость и отработана методика учета РГЭ при высокоточной синхронизации пространственно-разнесенных часов с помощью различных средств и систем [10, 13, 22—26] и в том числе — применительно к СРНС NAVSTAR [4—6, 12, 18, 19].

К основным РГЭ, влияющим на процессы, связанные с относительным ходом времени и распространением электромагнитных сигналов, относятся следующие.

1. Эффект Доплера второго порядка. Состоит во влиянии скоростей движения двух объектов — носителей часов на измеряемую величину относительного частотного сдвига формируемых ими сигналов. При этом часы, движущиеся, например, в инерциальной системе отсчета с большей скоростью, идут медленнее. Этот эффект приводит к необходимости внесения соответствующих поправок при математическом описании смещения частоты принятого сигнала с использованием соотношения для классического эффекта Доплера первого порядка и также при определении текущей величины относительного расхождения синхронизируемых ЧВ [4—7, 12, 22, 23, 25, 27, 28].

2. Гравитационный сдвиг частоты. Состоит во влиянии разности гравитационных потенциалов в местах расположения носителей часов, обусловленной неоднородностью гравитационного поля, на измеряемую величину относительного частотного сдвига формируемых ими сигналов. При этом часы, расположенные в областях пространства с большим абсолютным значением гравитационного потенциала, идут медленнее часов, расположенных в областях пространства с меньшим абсолютным значением гравитационного потенциала, т. е. часы вблизи массивных тел идут медленнее часов, удаленных от этих тел. Этот эффект приводит к необходимости внесения соответствующих поправок в тех же случаях, что и первый РГЭ [4—7, 12, 22, 23, 25, 27, 28].

3. Эффекты, связанные с вращением используемых систем отсчета. Состоят во влиянии так называемых устранимых гравитационных полей на математическую интерпретацию в рамках ОТО результатов измерений частотного сдвига и временного запаздывания электромагнитных сигналов. Описываются с помощью введения дополнительных скалярного потенциала, влияние

которого аналогично эффекту Доплера второго порядка или гравитационному сдвигу частоты, и векторного потенциала, влияние которого аналогично эффекту Саньяка. Эти эффекты, отсутствующие при использовании инерциальных систем отсчета, приводят к необходимости внесения соответствующих поправок в тех же случаях, что и первые два РГЭ, а также дополнительной векторной поправки при математическом описании навигационных определений и синхронизации пространственно-разнесенных часов [9, 12—15, 25, 28].

4. Эффекты более высокого порядка малости. Это прежде всего эффект запаздывания электромагнитного сигнала в гравитационном поле, обуславливающий также дополнительный сдвиг частоты принимаемого сигнала. Кроме того, это динамические эффекты, влияющие на движение в гравитационных полях различных объектов, в том числе НИСЗ, эффекты увеличения инерциальных систем отсчета гравитационными полями движущихся, в том числе, вращающихся тел (эффекты типа Лензе — Тирринга). РГЭ, влияющие на значения взаимных расстояний и скоростей объектов, и некоторые другие. Перечисленные РГЭ приводят к наличию соответствующих поправок, величины которых тем не менее пренебрежимо малы по сравнению с остаточными погрешностями учета нерелятивистских эффектов, например рефракции радиоволн в тропосфере, а также по сравнению с немоделируемыми погрешностями, обусловленными дрейфом часов, влиянием светового давления на движение НИСЗ, погрешностями привязки и изменением координат наземных пунктов вследствие лунно-солнечных приливов в коре Земли, движения полюсов и т. п. Суммарное влияние этих РГЭ на точность относительной синхронизации часов в околосреднем пространстве (в том числе по сигналам СРНС NAVSTAR) оценивается величиной, не превосходящей 0,03 нс [9, 24, 29].

Математическое описание частотно-временных поправок, обусловленных РГЭ

Согласно ОТО часы измеряют некоторую абсолютную величину — инвариантный интервал dt псевдориманова многообразного пространства, называемого пространством — время. В произвольной системе координат (x_μ) действие гравитационного поля описывается метрическим тензором, определяющим линейный элемент в пространстве — времени,

$$c^2 dt^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu} \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме; $g_{\mu\nu}$ — компоненты метрического тензора. В рамках современных требований к точности НВО $g_{\mu\nu}$ имеют следующий вид:

$$g_{00} = 1 + \frac{2U}{c^2}; \quad g_{p0} = 0; \quad g_{pq} = -\delta_{pq} \quad (2)$$

где U — гравитационный потенциал; δ_{pq} — символ Кронекера; $p, q = 1, 2, 3$ [9, 10, 22, 25, 26, 30].

Следует заметить, что все «жизнеспособные» теории гравитации с точностью до членов порядка $1/c^2$ имеют вид метрики пространства — времени типа (1), (2), поэтому рассмотрение проявления РГЭ в рамках ОТО с достаточной точностью не противоречит другим, не эйнштейновским, теориям гравитации [30].

Входящее в соотношение (1) собственное время τ — это время, реально отсчитываемое движущимися в гравитационных полях часами. Координатное время $t(x_0 = ct$ — четвертая независимая координата пространства — времени наряду с пространственными координатами x, y, z) — это время, которое должны отсчитывать часы, неподвижные относительно используемой системы координат и находящиеся на бесконечно большом расстоянии от источников гравитационного поля. Связь между собственным временем τ и координатным временем t следует из соотношения (1), которое при использовании инерциальной системы отсчета с началом в центре масс Земли с учетом (2) можно записать следующим образом:

$$d\tau = \left(1 + \frac{U}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2}\right) dt \quad (3)$$

где v — модуль геоцентрического вектора скорости часов, причем с достаточной точностью $v = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

Заметим также, что в рамках приближения (1), (2) пространственные координаты и скорости имеют обычный ньютоновский смысл, а координатное время совпадает с эфемеридным — независимой переменной ньютоновских уравнений движения [30].

В ряде работ [4, 15, 25, 30] показано, что при современных требованиях к точности НВО при учете РГЭ влиянием гравитационных потенциалов Луны, Солнца и планет можно пренебречь. Кроме того, U в соотношении (3) является гравитационным потенциалом Земли с учетом лишь второй зональной гармоники, т. е.

$$U = -\frac{\mu_3}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{2} J_2 \frac{R_3^2}{r^2} \left(3 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right) \right\},$$

где μ_3, R_3, J_2 — гравитационный потенциал, радиус Земли и коэффициент при второй зональной гармонике геопотенциала; r — модуль геоцентрического радиуса-вектора часов, причем с достаточной точностью $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

Соотношение (3) позволяет получить необходимые зависимости для учета первого и второго РГЭ.

Отношение собственных частот принятого f_r и излученного f_t сигналов, необходимое для математической интерпретации измеряемого значения доплеровского смещения частоты (или интеграла от него), имеет следующий вид (без учета других, нерелятивистских эффектов и при условии идентичности используемых генераторов) [5, 26]:

$$\frac{f_r}{f_t} = \frac{d\tau_t}{d\tau_r} = \left(\frac{1 + 2U_t/c^2 - v_t^2/c^2}{1 + 2U_r/c^2 - v_r^2/c^2} \right)^{1/2} \times \frac{1 + n\dot{r}_r/c}{1 + n\dot{r}_t/c} \quad (4)$$

где величины с индексом t , определяемые в инерциальной системе координат на момент излучения сигнала, относятся к передатчику, а величины с индексом r , определяемые в той же системе координат на момент приема сигнала, относятся к приемнику, единичный вектор n определяется соотношением

$$n = \frac{r_t - r_r}{|r_t - r_r|}$$

С необходимой точностью соотношение (4) можно записать следующим образом [7]:

$$\frac{f_r - f_t}{f_t} = -\frac{\dot{D}}{c} + \frac{1}{c^2} \left\{ (U_t - U_r) - \frac{1}{2} (v_t^2 - v_r^2) \right\}, \quad (5)$$

где $D = (r_t - r_r)n$ — радиальная скорость источника сигнала относительно приемника.

Применительно к СРНС NAVSTAR описываемое соотношением (5) влияние РГЭ на величину относительного частотного сдвига сигнала НИСЗ-принимателем наземным потребителем, оценивается величиной около $4,48 \cdot 10^{-10}$. Этот дополнительный частотный сдвиг имеет постоянную и периодическую составляющие, причем последняя обусловлена в основном отличием орбиты НИСЗ от круговой [7, 8].

Соотношение для учета первого и второго РГЭ при определении текущей величины относительного расхождения ШВ синхронизируемых часов имеет следующий вид (без учета начальной рассинхронизации) [10]:

$$\Delta\tau = \tau_A - \tau_B = \frac{1}{c^2} \times \int_0^t \left\{ (U_A - U_B) - \frac{1}{2} (v_A^2 - v_B^2) \right\} dt, \quad (6)$$

где Δt — относительное расхождение ШВ часов объектов A и B , обусловленное первым и вторым РГЭ; t — эфемеридное время.

Применительно к СРНС NAVSTAR, описываемое соотношением (6), влияние РГЭ на скорость относительного ухода ШВ, формируемых бортовыми генераторами НИСЗ, и шкалы системного времени, формируемой опорным генератором одной из КС, оценивается величиной около 38,4 мкс в сутки (вековая составляющая, рассчитанная для случая движения НИСЗ по круговой орбите с номинальным значением большой полуоси). Влияние сжатия Земли на проявление РГЭ обуславливает дополнительный вековой уход БШВ, зависящий в основном от широты расположения КС, опорный генератор которой формирует шкалу системного времени. Наличие периодической составляющей ухода ШВ НИСЗ относительно шкалы системного времени, обусловленного РГЭ, вызвано в основном отклонением орбиты НИСЗ от круговой. Амплитуда периодических колебаний ШВ НИСЗ, пропорциональная эксцентриситету орбиты, оценивается значением 12 нс (при $e = 5 \cdot 10^{-3}$) [4—10].

Как уже отмечалось, соотношения (5) и (6) соответствуют инерциальной системе отсчета с началом в центре масс Земли. Подобные соотношения для дополнительного учета РГЭ, связанных с вращением используемой системы отсчета (например, при использовании координат и составляющих векторов скоростей часов, соответствующих гринвичской системе координат), можно получить различными способами. Первый состоит в преобразовании компонент метрического тензора (2) с учетом формул пересчета координат из инерциальной системы во вращающуюся и известного из тензорного анализа преобразования компонент ковариантных тензоров второго ранга [31]. Второй способ [10], приводящий в рамках приближения (1), (2) к аналогичному результату, состоит в использовании зависимости между векторами скорости объекта в инерциальной и вращающейся системах координат

$$v = v^* + \omega \times r^*,$$

где $\omega = (0, 0, \omega)$ — вектор угловой скорости вращения Земли; r^* , v^* — векторы положения и скорости объекта в гринвичской системе координат. В этом случае соотношение (3) запишется следующим образом:

$$dt: \left\{ 1 + \frac{U}{c^2} - \frac{1}{2c^2} \omega^2 (x^{*2} + y^{*2}) + \frac{1}{2c^2} v^{*2} + \frac{\omega}{c^2} (x^* y^* - x^* y^*) \right\} dt, \quad (7)$$

используя которое дважды (для часов объектов A и B), можно получить соотношение, подобные (5) и (6), необходимые для учета РГЭ в случае использования гринвичской системы координат.

Следует заметить, что в случае математической интерпретации результатов синхронизации часов с использованием электромагнитных сигналов (транспортируемых часов) интеграл от последнего раскладываемого соотношения (7) по траектории распространения синхронизирующего сигнала (траектории перемещения транспортируемых часов) обуславливает наличие дополнительной релятивистской поправки

$$\Delta t_{\text{rot}} = \frac{2\omega}{c^2} S, \quad (8)$$

где S — площадь проекции фигуры, ограниченной геоцентрическими радиусами-векторами синхронизируемых часов объектов A и B и траекторией распространения синхронизирующего сигнала (траекторией перемещения транспортируемых часов), на плоскость экватора Земли. Значение S берется со знаком плюс, если направление распространения сигнала (перемещения транспортируемых часов) имеет восточную составляющую, минус — западную. Коэффициент пропорциональности $2\omega/c^2$ численно равен $1,6227 \cdot 10^{-8}$ нс/км². Значение поправки Δt_{rot} может достигать нескольких сотен наносекунд для практических значений S [12—14, 25, 28].

Применительно к СРНС NAVSTAR влияние эффекта Саньяка, описываемое соотношением (8), на точность синхронизации пространственно разнесенных часов может также достигать величины порядка нескольких сотен наносекунд в зависимости от геометрии. Соответствующая релятивистская поправка, учет которой необходимо проводить при обработке на борту потребителя результатов измерений временной задержки сигналов НИСЗ с целью решения задачи НВО, может достигать значения до 100 нс [9, 13, 15].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ПРОЯВЛЕНИЯ РГЭ

Отработка методики и технических решений по учету РГЭ в СРНС NAVSTAR основывалась в основном на результатах анализа экспериментальных данных, полученных с помощью навигационного технологического спутника NTS - 2 [5, 6, 10]. В качестве анализируемого параметра использовался интеграл от нормированного доплеровского смещения частоты

$$T = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{f_i - f_i}{f_i} dt, \quad (9)$$

где (t_i, t_{i+1}) — интервал интегрирования. С необходимой точностью соотношение (9) было случая кеплеровской аппроксимации орбиты НИСЗ и использования геоцентрической инерциальной системы координат с учетом соотношения (5), малости интервала $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ можно преобразовать к следующему виду [5]:

$$T = \frac{1}{c} [D(t_{i+1}) - D(t_i)] + \frac{1}{c} \Delta D_{\text{тр}} + \frac{1}{c^2} \left\{ -\frac{3\mu_3}{2a} - \frac{2\mu_3}{a} e - U(r_i) + \frac{v_i^2}{2} \right\} \Delta t, \quad (10)$$

где $\Delta D_{\text{тр}}$ — поправка, обусловленная тропосферной рефракцией радиоволн; a, e — большая полуось и эксцентриситет орбиты НИСЗ.

При обработке результатов измерений на достаточно большом временном интервале было получено среднее значение относительного частотного сдвига, равное $4,47 \cdot 10^{-10}$ при СКП, равной $0,03 \cdot 10^{-10}$. В силу того что относительная нестабильность бортового генератора NTS-2 была достаточно мала (несколько единиц тринадцатого знака), наблюдаемое смещение частоты бортового генератора относительно частот опорных генераторов наземных станций слежения трактовалось как обусловленное чисто РГЭ. Значение же входящей в соотношение (10) поправки, обусловленной РГЭ, вычисленное для известных параметров орбиты НИСЗ, составило $4,46 \cdot 10^{-10}$. Таким образом, разность между наблюдаемым и теоретическим значением относительного частотного сдвига, обусловленного РГЭ, оценивается величиной $0,01 \cdot 10^{-10}$, что составляет менее одного процента от теоретического значения. Тем самым с высокой точностью было получено экспериментальное подтверждение проявления и обоснована необходимость учета РГЭ в СРНС NAVSTAR как при обработке результатов траекторных измерений и сверки шкал времени сети НИСЗ, так и при прогнозе текущего значения ухода БШВ относительно шкалы системного времени.

Проведенные эксперименты по синхронизации пространственно разнесенных часов с помощью сигналов СРНС NAVSTAR подтвердили также необходимость учета эффекта Саньяка при математической интерпретации результатов измерений временного запаздывания сигналов НИСЗ. Разность между экспериментально полученным и теоретическим значениями соответствующей поправки составила 5 нс, что соответствовало точности проводимых измерений [12, 18, 19].

Проявление РГЭ при обработке результатов измерений

Разработка методики учета влияния РГЭ в СРНС NAVSTAR (наряду с высокими требованиями, предъявляемыми к точности НВО) вызвана необходимостью согласования различных систем отсчета, используемых при измерениях и обработке их результатов, обусловленной следующими причинами.

Во-первых, измеряемые радионавигационные параметры соответствуют системам отсчета, связанным с НИСЗ, а результаты навигационных определений должны соответствовать системам отсчета, связанным с Землей. Во-вторых, используемый в СРНС NAVSTAR беззапросный способ измерения радионавигационных параметров требует обеспечения высокой точной взаимной синхронизации БШВ НИСЗ. Однако орбитальное движение НИСЗ приводит к относительному расхождению начал систем отсчета пространственных координат, а нестабильность бортовых генераторов и влияние РГЭ — к относительному расхождению начал отсчета времени.

Согласование систем отсчета пространственных и временной координат в СРНС NAVSTAR реализуется путем снабжения потребителей ЭВИ (информацией о положении и скорости НИСЗ в геоцентрической системе координат и параметрах ухода БШВ относительно шкалы системного времени) на дискретные моменты времени и использования в АП алгоритмов определения текущих эфемерид НИСЗ и поправок к частоте излучаемого радионавигационного сигнала и БШВ.

Эфемеридно-временная информация формируется подсистемой КУ в результате проведения траекторных измерений и сверки БШВ НИСЗ. В силу высоких требований к точности эфемеридно-временного обеспечения учет проявления РГЭ необходимо проводить при синхронизации опорных генераторов сети КС [11] и при обработке результатов траекторных измерений [16, 20] и сверки БШВ [11, 16], а также при прогнозе ухода БШВ НИСЗ относительно шкалы системного времени [6—8, 11, 16].

Учет релятивистских поправок, связанных с вращением используемой гринвичской системы координат, и при необходимости учет дополнительных поправок, входящих в соотношение (4) и не вошедших в соотношение (5), необходимо проводить непосредственно в АП, так как их значения зависят от положения и параметров движения потребителя.

Кроме того, при сопоставлении результатов синхронизации пространственно разнесенных часов, реализованной различными средствами и системами, с результатами синхронизации по сигналам СРНС NAVSTAR необходимо учитывать специфику проявления РГЭ в каждом конкретном случае [10, 12, 13, 15].

Реализация учета РГЭ

Как уже отмечалось, влияние РГЭ на измеряемую величину смещения частоты принимаемого сигнала, излучаемого НИСЗ, носит не только постоянный, но и периодический характер, причем периодическая составляющая смещения частоты обусловлена в основном отличием эксцентриситета орбиты от нулевого значения. Аналогично влияние РГЭ на уход БШВ НИСЗ относительно шкалы системного времени, формируемой опорным генератором одной из КС, имеет как вековой, так и периодический характер.

Постоянное смещение частоты излучаемых сигналов и вековой уход БШВ НИСЗ относительно шкалы системного времени состоят из двух частей. Первая часть, преобладающая, является одинаковой для всех НИСЗ. Она обусловлена влиянием двух факторов на относительный уход БШВ НИСЗ и шкалы системного времени: 1) разностью гравитационных потенциалов шарообразной Земли на расстояниях от ее центра, соответствующих радиусам-векторам НИСЗ на номинальной круговой орбите и КС; 2) разностью квадратов скоростей движения НИСЗ и КС в инерциальной системе координат. Вторая часть различная для разных НИСЗ обусловлена как отклонением больших полуосей орбит НИСЗ от номинального значения, так и влиянием второй зональной гармоник геопотенциала.

Учет общих для всех НИСЗ постоянного смещения частоты излучаемых сигналов и векового ухода БШВ относительно шкалы системного времени, обусловленных РГЭ, реализуется в СРНС путем изменения частоты бортовых генераторов НИСЗ до их запуска на орбиту, а именно частота бортового задающего генератора каждого НИСЗ уменьшается относительно номинала 10,23 МГц на величину $4,45 \cdot 10^{-10}$ (некоторые источники дают величину $4,443 \cdot 10^{-10}$ [5] и $4,484 \cdot 10^{-10}$ [8]) и составляет $10,22999999545$ МГц [4, 7, 10, 17]. Эта коррекция, рассчитанная на номинальные параметры орбит НИСЗ, компенсирует более 99,6% фактического частотного сдвига, обусловленного РГЭ [6].

Компенсация остаточных составляющих сдвига частоты излучаемых сигналов и ухода БШВ НИСЗ проводится алгоритмическим способом при обработке результатов

траекторных измерений и сверки БШВ [11, 16, 20] и формировании частотно-временной информации [6—8, 11, 16], проводимых под системой КУ, и при обработке результатов измерений радионавигационных параметров в АП.

При формировании частотно-временной информации уход БШВ каждого НИСЗ относительно шкалы системного времени, обусловленный РГЭ, аппроксимируется полиномом второго порядка, что позволяет учесть остаточное влияние РГЭ с точностью не хуже 1 нс на интервале около 1 ч [8]. Полином второго порядка является оптимальным и для аппроксимации характеристик дрейфа бортовых генераторов НИСЗ [8, 11], поэтому в СРНС NAVSTAR реализован совместный учет дрейфа генераторов и влияния РГЭ путем расчета коэффициентов соответствующего полинома и закладки их в виде частотно-временной информации на борту НИСЗ.

Учет эффекта Доплера второго порядка и гравитационного сдвига частоты при обработке результатов измерений радионавигационных параметров носит в основном пассивный характер и состоит, во-первых, в приеме частотно-временной информации, содержащей релятивистские и гравитационные составляющие, и использовании ее при определении текущих поправок к частоте излучаемого сигнала и БШВ и, во-вторых, в измерении радионавигационных параметров относительно НИСЗ, частоты излучаемых сигналов которых смещены относительно номинала на необходимую величину.

Учет РГЭ, связанных с использованием вращающейся (гринвичской) системы координат, проводится в подсистеме КУ и в АП также алгоритмическим способом и не представляет трудностей [9, 12, 15, 18, 19, 25].

Правомерность использования изложенного способа учета основных РГЭ при обработке результатов измерений обусловлена слабой зависимостью степени проявления РГЭ от параметров движения потребителя. Другими словами, эффект Доплера второго порядка и гравитационный сдвиг частоты обуславливают частотно-временные смещения сигналов НИСЗ, величины которых являются практически одинаковыми для подсистем КУ и потребителей [11]. Это определяется, в частности, тем, что часы, расположенные в различных точках геоида, идут синхронно, а относительный частотный сдвиг, обусловленный их превышением над геоидом, равным, например, 1 км, составляет $1,091 \cdot 10^{-13}$ [10, 25, 29]. Таким образом, в ближайшем околоземном пространстве (по крайней мере, до высот порядка 10 км) и при реальных скоростях движения различных потребителей изложенная мето-

дика учета РГЭ обеспечивает требуемую точность НВО по сигналам СРНС NAVSTAR. Лишь в некоторых случаях, например при высокоточной синхронизации пространственно-разнесенных стандартов времени и частоты и при проведении НВО на борту высокоскоростных потребителей при условии предъявления повышенных требований к точности определения их векторов скорости, необходим дополнительный учет РГЭ, зависящих от положения и параметров движения приемника сигналов СРНС NAVSTAR [4, 13, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью обеспечения высоких требований, предъявляемых к точности НВО по сигналам СРНС NAVSTAR, во всех трех ее подсистемах проводится учет РГЭ при обработке результатов измерений.

Уменьшение относительно номинала частот бортовых задающих генераторов НИСЗ позволяет исключить основные составляющие смещения частот сигналов, излучаемых НИСЗ, и ухода их БШВ относительно шкалы системного времени, обусловленные РГЭ.

Учет остаточного влияния РГЭ проводится алгоритмическим способом и реализуется, во-первых, при обработке результатов траекторных измерений и сверки БШВ сети НИСЗ и формирования частотно-временной информации, проводимых подсистемой КУ, и, во-вторых, при обработке результатов измерений радионавигационных параметров в АП.

В дальнейшем, при совершенствовании эфемеридного и частотно-временного обеспечения СРНС NAVSTAR, уменьшении случайных и систематических погрешностей измерений радионавигационных параметров, уточнении моделей рефракции радиоволн в тропосфере, использовании фазового метода обработки сигналов НИСЗ, реализации дифференциального режима системы и т. п., возникнет реальная возможность значительного повышения точности НВО, что обусловит необходимость учета ряда дополнительных РГЭ. К ним в первую очередь относятся РГЭ, зависящие от положения и параметров движения потребителя, и эффект запаздывания электромагнитных сигналов в гравитационном поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко И. Н. и др.— Зарубежная радиоэлектроника, 1980, N 8.
2. Волюнкин А. И. и др.— Зарубежная радиоэлектроника, 1983, N 4, N 5.
3. Новиков И. А. и др.— Зарубежная радиоэлектроника, 1985, N 11.

4. Jorgensen P. S. — In: IEEE PLANS'86, Las Vegas, N. V., 1986, 4—7/XI.
5. Harkins M. D. — Radio Science, 1979, v. 14, N 4.
6. McCaskill T. B. and Buisson J. A. — In: Proc. 1st Int. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville, MD, 1985, 15—19/IV.
7. Spilker J. J. — In: Global Positioning System, Washington, D. C., 1980.
8. Van Dierendonck A. J. e. a. — Ibid.
9. Shapiro I. I. — In: Proc. 10th Ann. PTTI Planning Meeting, Greenbelt, MD, 1978, 5—7/XII.
10. Alley C. O. — In: Proc. NATO Adv. Study Inst., Bud Windsheim, 1981, 16—29/VIII.
11. Van Dierendonck A. J., Birnbaum M. — In: Proc. 30th Ann. Freq. Control Symp., Ft. Monmouth, N. J., 1976, 2—4/VI.
12. Allan D. W. e. a. — Science News, 1985, v. 127, N 15.
13. Allan D. W. — In: Proc. 37th Ann. Freq. Control Symp., Philadelphia, PA, 1983, 1—7/VI.
14. Allan D. W. — J. Inst. Electron. and Telecommun. Eng., 1981, v. 27, N 10.
15. Ashby N., Allan D. W. — Radio Science, 1979, v. 14, N 4.
16. Russel S. S. and Schaibly J. H. — In: Global Positioning System, Washington, D. C., 1980.
17. Milliken P. J. and Zoller C. J. — Ibid.
18. Ashby N. and Allan D. W. — Phys. Rev. Lett., 1984, v. 53, N 19.
19. Allan D. W. e. a. — Science, 1985, v. 228.
20. Van Dierendonck A. J. e. a. — In: Global Positioning System, Washington, D. C., 1980.
21. Divine D. III, Francisco Sh. G. — In: IEEE PLANS'84, San Diego, CA, 1984, 26—29/XI.
22. Vessot R. F. C. — J. Phys., 1981, t. 42, supp. au n° 12.
23. Vessot R. F. C. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 45, N 26.
24. Vessot R. F. C. — Radio Science, 1979, v. 14, N 4.
25. Saburi Y. — Дэнси цусин гаккайси, 1983, т. 66, N 1.
26. Bertotti B. — Radio Science, 1979, v. 14, N 4.
27. Moreau R. — J. Phys., 1981, t. 42, supp. au n° 12.
28. CCIR, XVI th Plenary Assembly, Report 439-3 (MOD F), Doc. 7/1017-E, Dubrovnik, 1986, 10/I.
29. Giannoni C. — Am. J. Phys., 1979, v. 47, N 5.
30. Moyer T. D. — Celestial Mechanics, 1981, v. 23, N 1.
31. Tourrenc Ph. — J. Phys., 1981, t. 42, supp. au n° 12.