

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

к.т.н. И.А. Кашаев, к.т.н. С.Н. Флерко, В.Н. Дейнеко  
(представил д.т.н., проф. А.И. Стрелков)

Рассматривается информационное взаимодействие элементов дифференциальных спутниковых подсистем. Приведена структурная схема системы. Показаны составные части, принципы организации измерений, информационные потоки, циркулирующие в системе.

Известно, что спутниковая радионавигационная система (СРНС) представляет собой сложную систему и характеризуется большим количеством взаимодействующих составных элементов, разветвленной информационной сетью и интенсивными потоками информации и функционированием в условиях воздействий возмущающих факторов. Дифференциальные навигационные подсистемы позволяют не только удовлетворять наиболее жесткие требования навигационного обеспечения, но и реализовать контроль целостности. Поэтому исследование свойств и условий функционирования системы невозможно без анализа информационного взаимодействия между элементами подсистемы.

СРНС необходимо рассматривать как совокупность трех сегментов: космический сегмент, наземный сегмент и сегмент потребителя (рис.1).

Форма представления координатно - временной информации может классифицироваться на измерительную информацию, служебную информацию, контрольно - корректирующую информацию. Носителем измерительной информации являются радиосигналы, излучаемые навигационным космическим аппаратом (НКА). Они несут информацию о времени, координатах, частотах опорных сигналов и кодов для проведения координатно-временных определений. В составе служебной информации передаются поправки к уходу бортовых часов НКА, параметры задержки распространения радиоволн в ионосфере, оперативная эфемеридная информация о данном НКА, альманах, информация о состоянии и функционировании каждого НКА системы. Контрольно - корректирующая информация содержит дифференциальные поправки к основным источникам погрешностей измерений.

Космический сегмент представляет собой систему координировано обращающихся на своих орбитах спутников, обеспечивающих глобальное непрерывное покрытие всей земной поверхности.

Описываемый уравнениями (1) объединенный сигнал подается в

установленное на спутнике антенное устройство, с помощью которого модулированные радиосигналы излучаются в направлении земной поверхности:

$$\begin{aligned} U_{L1} &= U_{mL1} (P(t)D(t)\cos(f_{L1}t) + C/A(t)D(t)\sin(f_{L1}t)); \\ U_{L2} &= U_{mL2} P(t)D(t)\cos(f_{L2}t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P(t)$ ,  $C/A(t)$  и  $D(t)$  - последовательности бинарных состояний  $P$  - кода,  $C/A$  кода и навигационного сообщения, соответствующие +1 или -1. При прохождении сигналом пути от КА до приемной антенны он подвергается воздействию атмосферы  $\nabla_{атм}$  и преднамеренных помех  $\mu$ .

Сегмент потребителей включает приемники ГЛОНАСС и GPS и общество самих пользователей. Навигационные приемники принимают сигналы ГЛОНАСС и/или GPS, обрабатывают их и определяет радионавигационные параметры (псевдодальности и псевдоскорости). Затем вычисляют геоцентрические координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и на их основе геодезические координаты и высоту над опорным эллипсоидом, поправку к местной шкале времени  $T$  относительно системного времени ГЛОНАСС (GPS) и составляющие вектора скорости. Модель измерений потребителя описывается уравнением

$$\hat{R}_{Пj}^j = R_{Пj}^j + \bar{G}_j^T \Delta X_j + \alpha + \Delta_{Пj}^{атм} + \delta_{Пj}, \quad (2)$$

где  $G_j^T = \left\| \hat{g}_{Пjx}^j, \hat{g}_{Пjy}^j, \hat{g}_{Пjz}^j, 1 \right\|$  - матрица частных производных потребителя;

$R_{Пj}^j = \sqrt{(\tilde{x}_{Пj} - \bar{X}_j)^2 + (\tilde{y}_{Пj} - \bar{Y}_j)^2 + (\tilde{z}_{Пj} - \bar{Z}_j)^2}$  - геометрическая дальность от потребителя до  $j$ -го спутника;

$\Delta \bar{X}_j = \left\| \Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j \right\|^T$  - вектор погрешностей координат  $j$ -го спутника КНС;

$\alpha_j$  - расхождение шкал времени НКА относительно системного времени ГЛОНАСС и GPS;

$\Delta_{Пj}^{атм}$  - тропосферные погрешности измерений;

$\delta_{ij}$  - флуктуационные погрешности измерений.

Дифференциальная подсистема состоит из сети контрольных станций (КС), каждая из которых формирует и передает в центр сети дифференциальные поправки по  $j$ -му спутнику. Эти поправки можно представить в виде

$$\bar{V}_j = R_{ксj}^j + \bar{D}_j \Delta X_j + \alpha I + \Delta_{ксj}^{атм} + \delta_{ксj},$$

где  $\bar{D}_j$  - матрица частных производных;  $R_{kc}^j$  - геометрическая дальность от КС до НКА.

Каждая такая поправка формируется к измерениям псевдодальностей относительно спутников космической навигационной системы (КНС). Она определяется как разность между измеренным и предвычисленным значением дальностей между контрольной станцией и спутником и содержит в себе раздельные поправки к эфемеридной составляющей погрешности  $D_j \Delta \bar{X}_j$ , атмосферной составляющей погрешности  $\bar{\Delta}_{kc}^{атм}$ , расхождению шкал времени спутника и потребителя  $\alpha I$  и шумовой составляющей погрешности  $\bar{\delta}_{kcj}$ .

При построении такой дифференциальной подсистемы, предполагается, что стационарные пункты оборудуются стандартной аппаратурой контрольных станций (высокоточные двухчастотные приемники навигационных сигналов КНС, ПЭВМ, средства связи и т.д.), и располагаются на территории, заданной для обеспечения дифференциального режима измерений, в заданных точках. Один из пунктов выбирается в качестве главного (ГКС), а все остальные связываются с главным пунктом, линиями связи. ГКС оборудуется ЭВМ высокой производительности, позволяющей производить обработку и хранение больших массивов данных. Кроме этого, в состав дифференциальной подсистемы также входит высокостабильный сетевой эталон времени и частоты (ВСЭВЧ), который образует основную временную шкалу всей сети КС и непрерывно синхронизируется со шкалами времени и частоты космических навигационных систем (КНС), которые, в свою очередь, синхронизируются эталонами времени и частоты (ЭВЧ) стран владельцев КНС и со шкалой времени Госэталона времени и частоты Украины (ГСВЧ). Остальные пункты сети КС производят периодическую сверку своих шкал времени со шкалой времени главного КС по сигналам космической навигационной системы.

Все контрольные станции сети (включая и главный КС) производят одновременные измерения текущих навигационных параметров относительно всех спутников, входящих в «рабочее созвездие» сети. Измерительная информация, полученная КС, частично обрабатывается и передается для дальнейшей обработки на ГКС. Главная контрольная станция, получая информацию от опорных пунктов сети, производит вторичную обработку данных и решает задачу формирования дифференциальных поправок к основным источникам погрешностей измерений. На главной контрольной станции массив измерений от сети контрольных станций должен обрабатываться таким образом, чтобы максимально скомпенсировать вклад таких медленноменяющихся погрешностей измерений ап-

паратуры потребителей, как эфемеридные, атмосферные, частотно - временные.

В результате решения задачи на ГКС формируются сетевые поправки  $\Pi_j$  к координатам, составляющим скоростей, уходам шкал времени и частоты спутников относительно системных шкал КНС и передаются потребителю.

Кроме того, на ГКС должны быть также определены параметры расхождений шкал времени и частоты КС относительно ГКС. Погрешности рассинхронизации шкал времени КС относительно главной могут быть представлены вектором  $\vec{\Delta} = \Delta_0 \vec{I} + \vec{\eta}_t$ , где  $\Delta_0$  - среднее расхождений шкал времени ГКС и СРНС;  $\vec{I}$  - единичный вектор;  $\vec{\eta}_t$  - отклонения шкал времени КС от величины  $\Delta_0$ . Вычисленные поправки по соответствующим каналам связи передаются потребителю для использования в решении его навигационной задачи.

Приведенное обобщенное описание СРНС позволяет определить параметры системы, которые характеризуют её состояние в данный момент времени, задают её свойства и характеристики. Знание таких параметров системы позволит выбрать такие критерии, которые с достаточной объективностью отражали бы влияние использования этой системы на выполнение задач потребителем, т.е. оценить эффективность навигационной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верещак А.П., Жалило А.А., Ноздрин И.Г., Флерко С.Н. Потенциальные возможности реализации широкозонной дифференциальной навигации по сигналам космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС в Украине // Космічна наука і технологія. – 1998. – Т.4, № 5/6. – С. 56 - 61.
2. Белавин О.В. Основы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1967. – 465 с.
3. Жалило А.А. Методический подход и алгоритмы реализации дифференциального метода спутниковой навигации по наблюдениям сетей контрольных станций // Сб.тр.7 - й С.- Пб. НТК по интегрированным навигационным системам. – С.-Пб. – 1996. – 164 с.
4. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Экотрендз, 2000. – 220 с.

*Поступила в редколлегию 25.06.2001*