

Е.Т. Скорик, К.Ф. Волох

**СИНТЕЗ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ УКРАИНЫ**

Рассмотрена задача синтеза национальной (автономной) спутниковой навигационной системы Украины. В качестве альтернативы среднеорбитальным глобальным системам типа GPS и ГЛОНАСС предложена региональная модель, использующая геостационарные связные спутники, видимые с территории Украины. Предложено использовать арендуемый связной ресурс спутников при ретрансляции специальных навигационных сигналов, формируемых на наземных станциях. Рассмотрен как запросный активный, так и беззапросный пассивный режимы навигации. Проведен математический эксперимент по оценке точностных характеристик трехмерного пассивного местоопределения объектов в координатах территории Украины. Результаты моделирования подтвердили возможность автономной навигационной системы средних широт с точностями, достаточными для ряда задач местоопределения.

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) несомненно являются одними из самых выдающихся информационных систем, предложенных и реализованных во второй половине – конце XX века. Известные действующие СРНС типа GPS и ГЛОНАСС являются глобальными по охвату территории Земли со статусом, оговоренным в ряде международных соглашений с известными определенными ограничениями. Ограничения вызваны первичным военным характером СРНС, принадлежностью каждой из них одной стране (соответственно США и России), недостаточной достоверностью и надежностью систем для ряда ответственных режимов навигации (например, для безопасности и надежности управления воздушным движением), недоступностью точного кода для гражданских пользователей и, наконец, неопределенностью их использования в случае обострения политической обстановки в мире и при возникновении угрозы национальной безопасности для стран-владельцев СРНС.

Поэтому международные сообщества, в первую очередь Европейские в лице ESA, Евроконтроля и Еврокомиссии, приступили с 90-х годов к обоснованию, проектированию и экспериментальным исследованиям в направлении создания общегражданской глобальной системы спутниковой навигации с единым обозначением GNSS.

В настоящее время Украина использует навигационные поля GPS и ГЛОНАСС, как и большинство стран безлицензионно, без гарантий со стороны стран-владельцев СРНС, в пределах точностей общего открытого кода C/A GPS с ограниченным доступом (SA).

Украина как независимое государство, имеющее высокие космические технологии, с одной стороны как полноправный член международного сообщества на основе юридических соглашений должна использовать существующие навигационные проекты GPS, ГЛОНАСС и GNSS-1 (EGNOS) с учетом их статуса и особенностей, а с другой, в связи с объявленным внеблоковым статусом страны, должна иметь современное радионавигационное обслуживание с элементами независимого национального обеспечения. Первое необходимо для гарантии надежного и достоверного «гладкого» (непрерывного) навигационного обслуживания международных полетов через территорию Украины с учетом требований ИКАО воздушных судов.

Украина занимает стратегическое положение по обеспечению исторически сложившихся воздушных транзитных потоков «юг-север» и «запад-восток». Кроме того, через Украину проходят наземные транспортные коридоры по Критскому протоколу, в том числе

трансевропейско-азиатский корridor Лиссабон – Токио как новая современная реализация древнего «шелкового пути».

Поэтому в обеспечение международных требований в Украине в рамках Межведомственной комиссии при Кабинете Министров Украины по навигации и управлению транспортом и другими подвижными средствами готовится к реализации программа работ, заказчиком которой определено Национальное космическое агенство Украины.

Единственным официально действующим документом, регламентирующим навигационное обеспечение в Украине является "Закон Украины о космической деятельности на 1998 – 2002 гг.". Остальные документы, относящиеся к этой важной области народного хозяйства страны, такие, как "Концепция развития навигационного обеспечения", Радионавигационный план (РНП) и другие находятся в стадии разработки и пока не приняты.

Основой навигационного обеспечения Украины является наземная обеспечивающая структура типа сети контрольно-корректирующих станций (ККС), привязанных к государственной геодезической сети, с некоторым центром управления сетью ККС и специализированными линиями связи. Такая структура проектируется как самодостаточная для гарантированного использования навигационных полей GPS, ГЛОНАСС и GNSS-1 для навигационного обеспечения Украины. Одновременно с этим в Украине от космической отрасли бывшего СССР сохранена большая специальная инфраструктура наземных средств контрольно-измерительных пунктов (КИП), которая обеспечивала задачи траекторно-эфемеридных измерений космической аппаратуры (КА), контроля космического пространства с соответствующей работоспособной техникой и оставшейся частью высококвалифицированного персонала.

Именно вся эта наземная национальная структура в комплексе (ККС, Центр управления, КИП и др.) может быть использована при проектировании и создании автономной национальной (региональной) системы навигационного обеспечения Украины для специальных задач, таких как, например, зависимое управление транспортом и управление операциями в особый период.

Основы проектирования и синтеза СРНС хорошо систематизированы в монографии [1]. В своей основе СРНС проектируется, как правило, с глобальным перекрытием. Региональность СРНС проявляется как частный случай глобальных СРНС некоторых проектов. К настоящему времени известно несколько таких проектов с разной степенью разработки, выполненных как в США, так и в Европе. По определению проект EGNOS является региональным по Европе, так как содержит в своем составе канал RIC (Regional Integrity Canal), т.е. региональный канал целостности навигационных полей GPS и ГЛОНАСС.

Для того, чтобы провести оценку возможности создания автономной СРНС Украины в первом приближении, необходимо принять некоторые начальные условия. Перечислим их без особых обоснований.

- В сложившихся экономических условиях в стране не следует ожидать, что в ближайшее время для национальной СРНС будут созданы и запущены или приобретены специальные навигационные КА (НКА). Это означает, что для этих целей однозначно необходимо оценить только использование ресурса создаваемых национальных или арендуемых связных КА.

- Наиболее простым решением является использование для национальной системы специальной СРНС активного режима местоопределения как совместимого со связным трафиком. Активный режим является перспективным для создания комплексных систем управления и связи класса CNS – Communication, Navigation, Surveillance (связь, навигация, опознавание).

Системы класса CNS рекомендованы международными организациями для систем управления операциями, в том числе для зависимого (диспетчерского) управления транспортом. Относительно просто можно обеспечить первую проверку автономности системы

активного местоопределения с помощью арендуемых сейчас в Украине связанных геостационарно спутников (ГСС)

• Гораздо больший интерес представляет оценка возможности автономного пассивного способа местоопределения объектов (только на прием) при использовании набора геостационарных связанных КА в режиме кооперированной синхронной передачи навигационного сигнала. Нам неизвестно, чтобы подобный натурный эксперимент был когда либо проведен.

Для реализации пассивного способа требуется обеспечение следующих условий:

- постоянное измерение эфемерид НКА и их трансляция пользователям в общем кадре;
- наличие единой системной шкалы времени НКА;

Для задачи математического эксперимента считаем, что эти условия соблюдены. Тогда задача моделирования состоит:

– в проверке возможности получения трехмерных координат объектов одномерным набором геостационарных связанных КА на дуге в пределах наблюдаемости с территории Украины. Для СРНС GPS и ГЛОНАСС трехмерное местоопределение реализуется по тр – четыре НКА, размещенных в небе над наблюдателем в виде разнесенного по двум осям созвездия, гарантирующего требуемый для заданной точности геометрический фактор DOP по плоскости PDOP и по высоте HDOP;

- в получении численной оценки точности регионального местоопределения.

Для активного режима, эквивалентного радиолокации, измеряется истинная дальность до НКА. Двумерное местоопределение с требуемой точностью для средних широт реализуется при разносе геостационаров на 30° . Примем этот разнос в качестве начальной нормы для моделирования пассивного режима с измерением псевдодальности до НКА.

Предварительно составим следующую таблицу сравнений (табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Вариант	
	Актив	Пассив
Количество КА, задействованных в проекте	$\geq 2 \dots 3$	$\geq 3 \dots 5$
Количество земных управляющих станций в режиме «up-link»	1 . . 2	3 . . 5
Необходимость синхронизации шкалы времени КА	Нет	Обязательно
Навигационный параметр проекта	Дальность	Квазидальность
Сложность навигационного сигнала	Низкая	Средняя
Сложность оборудования пользователя	Средняя	Низкая
Решение проблемы "последняя миля" (передача данных местоопределения)	Решается (режим CNS)	Требуется дополнительное связанное оборудование
Скрытность работы оборудования пользователя	Низкая	Высокая
Сложность проекта	Средняя	Высокая
Сложность обеспечивающей наземной инфраструктуры	Низкая	Высокая

Веса параметров по вариантам "актив" или "пассив" зависят от таких факторов, как определение заказчика системы, степени использования прежней инфраструктуры космических войск СССР, оставшейся на территории Украины, массовости аппаратуры пользователя и др.

Для заказчиков Министерства транспорта и Укрэзрорух веса параметров явно складываются в пользу активного варианта. Для Министерства обороны и других силовых структур пассивный вариант будет иметь преимущества.

Основная задача оценки – это получение численных значений точности местоопределений пассивным методом по выбранным геостационарным КА. Только получение численных оценок при принятых допущениях позволит оценить перспективность для Украины этого проекта для дальнейшей системной разработки.

Для априорной оценки возможностей предлагаемой системы использовалась следующая методика моделирования в качестве математического эксперимента. Для заданного трехмерного объема пространства, ограниченного по широте B (от 48° до 52° с.ш.), долготе L (от 22° до 30° в.д.) и высоте H (от 0 до 10 км) проводился перебор точек с шагом по широте и долготе в 10 мин и высоте в 500 м.

В каждой точке (B, L, H) оценивалось количество видимых НКА $N(B, L, H)$. Для потребителя, находящегося на Земле, НКА считается видимым, если угол места γ линии визирования "потребитель – НКА" больше минимально допустимого γ_{\min} . Для потребителя, находящегося над Землей, НКА считается видимым, если угол места линии визирования «потребитель – НКА» $\gamma_{\text{п-НКА}} > 0$ либо, если угол $\gamma_{\text{п-НКА}} < 0$, но при этом угол места визирования "НКА – потребитель" $\gamma_{\text{НКА-п}} > 0$.

В качестве Земли был принят земной эллипсоид модели ОЗЭ-85, минимальный угол места в расчетах был принят $\gamma_{\min} = 15^{\circ}$.

Корреляционные матрицы погрешностей определения местоположения объекта, находящегося в данной точке (B, L, H) , рассчитывались по следующей схеме.

Пусть $\mathbf{X}_{\langle \rangle} = \langle \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z} \rangle^T$ – вектор-столбец координат объекта в системе координат ГОСК-85;

$\mathbf{X}^{Hi}_{\langle \rangle} = \langle \mathbf{X}^{Hi}, \mathbf{Y}^{Hi}, \mathbf{Z}^{Hi} \rangle^T$ – вектор-столбец координат i -го НКА в системе координат ГОСК-85;

$\mathbf{S}_{\langle N \rangle} = \langle \mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_i, \dots, \mathbf{S}_N \rangle^T$ – вектор-столбец псевдодальностей от объекта до каждого из обслуживающих его НКА;

$\mathbf{F} = [\partial \mathbf{S}_{\langle N \rangle} / \partial \mathbf{X}_{\langle \rangle}]$ – матрица частных производных от измеряемых на борту объекта навигационных параметров (псевдодальностей) по координатам данного объекта в ГОСК-85.

Разложим псевдодальности на составляющие: $\mathbf{S}_i = \mathbf{D}_i + \mathbf{a}_i + \mathbf{\zeta}_i$, $i=1, \dots, N$, где $\mathbf{D}_i = [(\mathbf{X}^{Hi} - \mathbf{X})^2 + (\mathbf{Y}^{Hi} - \mathbf{Y})^2 + (\mathbf{Z}^{Hi} - \mathbf{Z})^2]^{0.5}$ – истинные радиальные дальности от объекта до каждого из НКА, $\mathbf{D}_i = \mathbf{D}_i(B, L, H)$;

$\mathbf{a}_i \in N(0, \sigma_{\mathbf{a}_i}^2)$ – случайные погрешности, возникающие в результате неполной компенсации воздействия атмосферных шумов, многолучевости на пути распространения навигационных сигналов, шумов измерений, $\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i(B, L, H)$,

$\mathbf{\zeta}_i \in N(0, \sigma_{\mathbf{\zeta}_i}^2)$ – случайные погрешности определения и прогнозирования местоположения НКА в центре управления системой, которые оказываются заложенными в навигационные сигналы.

С целью упрощения расчетов было принято, что вектор псевдодальностей имеет нормальный закон распределения с математическим ожиданием

$\mathbf{D}_{[N]} = \langle \mathbf{D}_1, \dots, \mathbf{D}_i, \dots, \mathbf{D}_N \rangle$, а в качестве корреляционной матрицы $\mathbf{K}_{\mathbf{S}_{[N]}}$ принимается единичная матрица, умноженная на дисперсию псевдодальности, одинаковую для всех НКА:

$$\mathbf{K}_{\mathbf{S}_{[N]}} = \sigma_{\mathbf{D}}^2 \mathbf{E}_{[N]},$$

где $\sigma_{\mathbf{D}}^2 = \sigma_{\mathbf{a}}^2 + \sigma_{\mathbf{\zeta}}^2$.

При таких условиях корреляционная матрица погрешностей определения местоположения объекта, находящегося в данной точке (B, L, H) вычисляется по формуле

$$\mathbf{K}_{\mathbf{X}}(B, L, H) = (\mathbf{F}^T \mathbf{K}_{\mathbf{S}}^{-1} \mathbf{F})^{-1},$$

где элементы матрицы частных производных f_{ij} , $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, 3$ могут быть рассчитаны по формулам:

$$f_{i1} = (\mathbf{X}^{Hi} - \mathbf{X}(B, L, H)) / \mathbf{D}_i(B, L, H),$$

$$f_{i2} = (Y^{H_i} - Y(B,L,H)) / D_i(B,L,H),$$

$$f_{i3} = (Z^{H_i} - Z(B,L,H)) / D_i(B,L,H).$$

В табл. 2 приведены варианты группировок из четырех, пяти и шести НКА, по которым были получены численные результаты моделирования для различных значений σ_D .

Таблица 2

Группировка ГСС (позиция, название КА)		
1	2	3
-15,5°, Inmarsat –AOR –E	-12°, Orion –2	- 15,5°, Inmarsat–AOR – E
5°, Artemis	4°, Amos –1	5°, Artemis
25°, Artemis – F5	38°, Лыбидь (проект)	25°, Artemis – F5
64°, Inmarsat – IOR	60°, Intelsat 604	38°, Лыбидь (проект)
	90°, (вакансия)	64°, Inmarsat – IOR
		80°, Экспресс – 6

Результаты моделирования показывают следующее:

- Использование геостационарных связных КА по числу от четырех до шести, размещенных по дуге 95–100°, позволяет проводить трехмерное пассивное местоопределение объектов на широте Украины.

- При норме погрешности в измерении псевдодалности до КА $\sigma_D = 1$ м погрешность измерения плановых координат, по определению, численно совпадает с геометрическим фактором созвездия PDOP и изменяется по расчету для лучшей группировки 3 от 17,8 м на севере до 20,8 м на юге страны (см. рисунок). Точность в плоскости Земли ухудшается к югу из-за приближения к экватору, на котором метод не работоспособен.

- Точность определения высоты объектов в отличие от GPS выше, чем в плоскости Земли из-за лучшего геометрического фактора созвездия по высоте HDOP и составляет единицы метров.

По оценке величина погрешности не превышает погрешности GPS в режиме SA и близка к нормам разрешенных точностей местоопределения по действующим сейчас в Украине требованиям. Возможность улучшения точности метода при использовании дифференциальных режимов требует дополнительного анализа. Требуемая точность измерения эфемерид КА для реализации метода обеспечивается существующими техническими средствами.

Результаты математического моделирования показали, что использование группировки связных ГСС позволяет в принципе осуществить пассивное трехмерное местоопределение объектов в средних широтах с приемлемой для ряда задач точностью. Это дает основание рассматривать этот метод в качестве альтернативной основы для создания региональной национальной навигационной системы Украины, и том числе двойного применения, при условии принятия такого решения компетентными органами и формулировании тактико-технических требований на такую разработку.

Список литературы

1. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы.* – 2-е изд./ Под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993.

Стаття надійшла до редакції 30 грудня 1999 року.