

УДК 621.396.96

Потенциальные возможности реализации широкозонной дифференциальной навигации по сигналам космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС в Украине

**А. П. Верещак¹, А. А. Жалило¹,
И. Г. Ноздрин¹, С. Н. Флерко²**

¹Науково-дослідний Інститут радіовимірювань, Харків

²Харківський військовий університет

Надійшла до редакції 22.05.98

Оцінюються потенційні можливості реалізації широкозонної диференційної навігації за сигналами космічних навігаційних систем GPS і ГЛОНАСС в малих регіонах земної поверхні, таких як Україна. Оцінюється точність формування диференційних корекцій мережею контрольних станцій та результуюча точність координатно-часових визначень.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС) GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) в недалеком будущем станут основным средством навигационно-временных определений гражданских и военных потребителей. Вместе с тем непосредственное использование сигналов СРНС не обеспечивает современных требований большинства потребителей по точности и надежности навигационных определений. Влияние различных источников погрешностей измерений приводит к суммарной погрешности координатных определений потребителя по сигналам GPS около 100 м. Существует и проблема надежности навигационных определений (НО), состоящая в том, что информация об отказах на навигационном спутнике при штатной эксплуатации СРНС поступает потребителю с за-

паздыванием до нескольких часов с момента возникновения отказа [2].

Эффективным способом преодоления перечисленных недостатков является дополнение СРНС подсистемами, реализующими дифференциальный метод НО. Дифференциальный режим измерений широко используется в мире практически с первых дней развертывания глобальных СРНС и основывается на пространственно-временной корреляции основных погрешностей измерений в аппаратуре потребителей и в опорной точке земной поверхности, где устанавливается контрольная станция (КС). Традиционно при реализации дифференциального режима измерений в локальных регионах, где существуют повышенные требования к точности и надежности НО, применяются отдельные КС, которые формируют дифференциальную корректирующую информацию (ДКИ) в виде поправок к изме-

ряемым потребителями текущим навигационным параметрам (ТНП) — псевдодалностям и псевдоскоростям. При таком подходе точность НО потребителя ухудшается в зависимости от расстояния до КС [5, 6].

В последние годы в мире существенно возрос интерес к использованию разветвленных сетей КС, при реализации которых удастся значительно уменьшить зависимость точности НО потребителей от удаления до КС. Интерес в этой области представляют прежде всего сети КС, базирующиеся на принципах широкозонной дифференциальной навигации (ШДН), которые предполагают использование минимального количества КС для охвата и обеспечения высокоточной ДКИ достаточно больших регионов земной поверхности. Таким путем следует мировое сообщество (программы EGNOS, WAAS и MSAS) [2], создавая международную гражданскую глобальную спутниковую систему GNSS-1. Ее составными частями являются СРНС GPS и ГЛОНАСС, интегрированная международная сеть КС, реализующая метод ШДН для выработки и передачи потребителям ДКИ, и космический сегмент в виде геостационарных спутников (ГС) «Inmarsat-3», которые являются дополнительными навигационными точками и одновременно обеспечивают передачу ДКИ потребителям.

Наиболее эффективным является способ реализации ШДН, основанный на разделении значимых медленно изменяющихся погрешностей измерений: эфемеридных, частотно-временных (включая влияние режима селективного доступа СРНС GPS) и атмосферных составляющих. Реализация данного способа предполагает значительное разнесение КС в пространстве и обработку измерительной информации в едином центре сети.

В настоящее время Национальное космическое агентство Украины координирует работы по созданию национальной системы навигационного обеспечения, основу которой будет составлять опорная сеть КС, организованная согласно принципам ШДН. При этом рассматриваются возможности интеграции такой системы в международную глобальную навигационную систему GNSS-1.

В данной статье ставится цель исследования возможности реализации ШДН в относительно небольших регионах Земли, в частности на территории Украины, а также определения потенциальной точности навигационных определений потребителей при условии использования ДКИ от сети КС ШДН. При этом предполагается, что при формировании ДКИ используются результаты прецизионных фазовых измерений на несущих частотах навигационных сигналов.

ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ШИРОКОЗОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ. ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Принцип ШДН основан на потенциальной возможности разделения основных источников погрешностей навигационных определений по составляющим на основе использования данных, полученных в многобазисной сети станций контроля навигационного поля (или КС) [7]. Контрольные станции сети ШДН передают измерительную информацию в единый центр контроля навигационного поля (главная контрольная станция или ГКС) с целью ее сбора, обработки и расчета ДКИ к основным источникам погрешностей навигационных определений. ГКС также обеспечивает синхронизацию шкал времени (ШВ) отдельных КС.

Текущими навигационными параметрами, измеряемыми на КС в сети ШДН, являются псевдодалности и псевдоскорости всех спутников СРНС в рабочем созвездии сети ШДН. Будем полагать, что КС в сети ШДН осуществляют кодовые и фазовые (по С/А и/или Р-кодам или бескодовые) измерения от всех спутников СРНС в зоне их радиовидимости, а также от ГС с навигационным дополнением на борту. Использование на КС измерений фазы несущей навигационных сигналов открывает широкие возможности в повышении точности оценивания искомых параметров, однако обладает и сложностью реализации, связанной с разрешением неоднозначности фазовых измерений на больших измерительных базисах между КС. Решение этих проблем достигается путем формирования на ГКС разностей фазовых измерений каждой i -й КС относительно ГКС для j -го спутника СРНС, а также образования промежуточных измерительных базисов в сети и использования измерений на двух несущих частотах СРНС.

Полный вектор измеряемых наземной дифференциальной сетью КС параметров будет иметь вид

$$\mathbf{Q}^T = \|\| \mathbf{Q}_1^T, \mathbf{Q}_2^T, \dots, \mathbf{Q}_{p(t)}^T \|\|.$$

Здесь $p(t)$ — число спутников в рабочем созвездии сети КС ШДН в текущий момент времени;

$$\mathbf{Q}_j^T = \|\| \mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \dots, \mathbf{q}_{m(t)}^T \|\|_j$$

— вектор измеряемых сетью КС параметров для j -го спутника СРНС ($j = 1, 2, \dots, p(t)$) в рабочем созвездии сети КС; $m(t)$ — число КС, для которых j -й спутник находится в зоне радиовидимости;

$$(\mathbf{q}_i^T)_j = \|\| \Delta S_{1\Phi}(t), S_{1\kappa}(t), S_{i\kappa}(t), \dot{S}_{1\Phi}(t), \dot{S}_{i\Phi}(t) \|\|_j$$

— вектор измеряемых сетью КС и формируемых на

ГКС ТНП относительно i -й КС по j -му спутнику СРНС, который включает в себя разности фазовых псевдодальностей i -х КС и ГКС (как первой КС) для j -го спутника $\Delta S_{i1\Phi}^j(t)$, кодовые измерения псевдодальности ГКС $S_{1k}^j(t)$ и i -х КС $S_{ik}^j(t)$ и измерения псевдоскорости j -го спутника $\dot{S}_{i(\Phi)}^j(t)$ соответственно; $i = 2, 3, \dots, m(t)$ — номер контрольной станции в сети дифференциальной навигации.

Рассматриваемая схема реализации ШДН предполагает следующее. В сети КС преимущественно определяют параметры улучшенных местных моделей атмосферы (ионосферы и тропосферы), минимизируют путем фильтрации флюктуационные составляющие измерений и устраняют неоднозначность фазовых измерений. В этом случае принципиальные уравнения, описывающие процесс измерений в сети КС ШДН, имеют вид

$$\begin{cases} \Delta S_{i1\Phi}^j(t) = R_i^j(t) - R_1^j(t) + \nabla_{i1}(t) + \delta \Delta S_{i1\Phi}^j(t), \\ S_{1k}^j(t) = R_1^j(t) + \alpha^j(t) + \delta S_{1k}^j(t), \\ S_{ik}^j(t) = R_i^j(t) + \alpha^j(t) + \nabla_{i1}(t) + \delta S_{ik}^j(t), \\ \dot{S}_{i\Phi}^j(t) = \dot{R}_i^j(t) + \dot{\alpha}^j(t) + \delta \dot{S}_{i\Phi}^j(t), \\ \dot{S}_{i1\Phi}^j(t) = \dot{R}_i^j(t) + \dot{\alpha}^j(t) + \dot{\nabla}_{i1}(t) + \delta \dot{S}_{i1\Phi}^j(t), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$R_i^j(t) = \sqrt{(X^j - x_i)^2 + (Y^j - y_i)^2 + (Z^j - z_i)^2}$$

— геометрическая дальность j -го спутника относительно i -й КС; X^j, Y^j, Z^j — текущие координаты j -го спутника СРНС в гринвичской системе координат; x_i, y_i, z_i — известные с высокой точностью координаты фазового центра приемной антенны i -й КС;

$$\dot{R}_i^j(t) = \frac{1}{R(t)} [(X^j - x_i)\dot{X}^j + (Y^j - y_i)\dot{Y}^j + (Z^j - z_i)\dot{Z}^j]$$

— радиальная скорость j -го спутника СРНС; $\dot{X}^j, \dot{Y}^j, \dot{Z}^j$ — составляющие вектора скорости (СВС) j -го спутника СРНС;

$$\alpha^j(t) = \Delta_1^{N(t)}(t) - \Delta^j(t);$$

$\Delta_1^{N(t)}(t)$ — отклонение ШВ ГКС относительно системной шкалы времени СРНС GPS (ГЛОНАСС); $\Delta^j(t)$ — уход ШВ j -го спутника относительно системной ШВ СРНС (включая влияние режима селективного доступа GPS); $\dot{\alpha}^j(t)$ — скорость изменения параметра $\alpha^j(t)$; $\nabla_{i1}(t), \dot{\nabla}_{i1}(t)$ — текущие расхождения ШВ i -х КС относительно ШВ ГКС и скорость их изменения соответственно; $\delta \Delta S_{i1\Phi}^j(t), \delta S_{1k}^j(t)$ и $\delta \dot{S}_{i\Phi}^j(t)$ — остаточные погрешности соответ-

ствующих измерений, возникающие в результате погрешностей геодезической привязки КС, неполной компенсации воздействия атмосферных эффектов, эффектов многолучевости распространения навигационных сигналов, а также из-за шумов измерений.

Следует отметить, что ГКС является основным синхронизатором сети КС и должна быть оборудована высокостабильным квантовым стандартом частоты и времени, который подвергается непрерывной высокоточной сверке с системными шкалами СРНС при традиционной обработке результатов измерений самой ГКС. По этой причине параметр $\alpha^j(t)$ несет информацию прежде всего об уходе ШВ j -го спутника. Для упрощения авторы не останавливаются на том факте, что шкалы системного времени GPS и ГЛОНАСС различаются между собой. Однако принятая идеология синхронизации ШВ в различных СРНС позволяет достаточно просто и с высокой точностью обеспечить взаимную синхронизацию ШВ этих СРНС и ШВ ГКС путем длительного усреднения результатов временных опреледелений ГКС [6].

Дифференциальную корректирующую информацию, полученную по измерениям сети КС ШДН, предполагается передавать в аппаратуру потребителей через ГС (либо по другим каналам связи). Навигационные сигналы ГС будут ретранслироваться на двух несущих частотах, что позволит организовать на трассах «ГС—КС» измерения псевдодальности и псевдоскорости. Таким образом, потребители, осуществляя прием сигналов ГС, кроме источника ДКИ, приобретают дополнительную навигационную точку, улучшающую геометрию рабочего созвездия спутников.

Система уравнений (1) при задействовании ГС дополняется аналогичными уравнениями применительно к ГС.

Вектор оцениваемых сетью КС параметров, согласно изложенному процессу измерений и принципам реализации ШДН будет иметь следующий вид:

$$\Theta = \|\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{p(t)}; \nabla\|,$$

где

$$\Theta_j = \|\|X^j, Y^j, Z^j, \dot{X}^j, \dot{Y}^j, \dot{Z}^j, \alpha^j, \dot{\alpha}^j\|$$

— вектор оцениваемых сетью КС координатно-временных параметров j -го спутника СРНС в фиксированный момент времени;

$$\nabla = \|\|\nabla_{21}, \nabla_{31}, \dots, \nabla_{m(t)1}; \dot{\nabla}_{21}, \dot{\nabla}_{31}, \dots, \dot{\nabla}_{m(t)1}\|$$

— вектор оцениваемых параметров, характеризующий текущие расхождения ШВ КС относительно ШВ ГКС и скорости их изменения.

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ
ОПРЕДЕЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ
ИНФОРМАЦИИ ОТ СЕТИ КОНТРОЛЬНОЙ СТАНЦИИ**

Проведем оценку точности эфемеридно-временного обеспечения спутников СРНС и ГС по результатам измерений сети КС ШДН, а также результирующей точности координатно-временных определений у потребителя, использующего при решении навигационной задачи ДКИ от сети КС. Рассмотрим два варианта размещения сети КС. Первый вариант предполагает размещение КС лишь на территории Украины, второй вариант учитывает интеграцию сети КС Украины с аналогичными европейскими структурами.

Предварительный анализ соотношений измеряемых и оцениваемых параметров в системе уравнений (1) показывает, что для обеспечения однозначного решения необходимо иметь шесть КС в составе сети ШДН. Однако задача устранения неоднозначности фазовых измерений приводит к необходимости формирования промежуточных измерительных базисов в сети, что при учете величины измерительных базисов в пределах Украины требует увеличения числа КС сети.

При расчетах принималось, что контрольные станции размещены вблизи следующих городов:

вариант I — Дунаевцы (Хмельницкая обл.), Ужгород, Львов, Луцк, Киев, Чернигов, Харьков, Днепропетровск, Алчевск (Луганская обл.), Кировоград, Симферополь и Одесса;

вариант II — Дунаевцы (Хмельницкая обл.), Ужгород, Киев, Харьков, Алчевск (Луганской обл.), Кировоград, Симферополь, Познань (Польша), Тулуза (Франция), Барселона (Испания), Салоники (Греция) и Ноттингем (Великобритания).

КС в районе г. Дунаевцы в обоих вариантах выбиралась в качестве ГКС.

Остаточные погрешности измерений $\delta\Delta S_{i\Phi}^j(t)$, $\delta S_{iK}^j(t)$ и $\delta\dot{S}_{i\Phi}^j(t)$ принимались равными 0.8 см, 0.5 м и 0.3 см/с (1σ) соответственно, что отвечает характеристикам современной высокоточной аппаратуры. При этом полагалось, что погрешности оценки геодезической привязки сети КС не превышают 1 см (1σ).

Корреляционная матрица погрешностей оценки искомым параметров для текущего момента времени t рассчитывалась согласно известному соотношению [1]

$$K_Q = [A^T W A]^{-1}, \quad (2)$$

где W — весовая матрица измерений сети КС,

обратная корреляционной матрице остаточных погрешностей измерений в текущий момент времени t :

$$W = \text{diag} [W_1, W_2, \dots, W_j, W_{j+1}],$$

W_j — блок весовой матрицы измерений относительно j -го спутника СРНС (W_{j+1} — относительно ГС); A — матрица производных измеряемых параметров Q по оцениваемым элементам вектора Θ :

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & B_1 \\ 0 & A_2 & \dots & \dots & 0 & B_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & A_j & 0 & B_j \\ 0 & \dots & \dots & 0 & A_{j+1} & B_{j+1} \end{bmatrix}.$$

Здесь A_j — блок матрицы производных измерений КС по координатам и составляющим вектора скорости j -го спутника, а также по параметрам уходов ШВ j -го спутника; B_j — блок матрицы производных измерений КС по параметрам расхождений ШВ i -х КС относительно ГКС; $j = 1, 2, \dots, p(t)$ — номер спутника в обзоре сети КС.

Корреляционную матрицу погрешностей определения искомым параметров (2) удобно записать в блочном виде:

$$K_\Theta = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix},$$

а ее блоки представить согласно формул обращения блочных матриц [3]:

$$K_{11} = \begin{cases} (A_j^T W_j A_j)^{-1} + \\ + (A_j^T W_j A_j)^{-1} A_j^T W_j B_j K_{22} B_j^T W_j A_j (A_j^T W_j A_j)^{-1}, & i = j, \\ (A_i^T W_i A_i)^{-1} A_i^T W_i B_i K_{22} B_i^T W_i A_i (A_i^T W_i A_i)^{-1}, & i \neq j \end{cases}$$

— корреляционная матрица погрешностей оценки координатных параметров спутника СРНС (ГС), параметров ухода ШВ спутника, где i и j — порядковый номер соответствующих спутников СРНС и ГС в обзоре сети КС;

$$K_{22} = \left\{ \sum_{j=1}^p [B_j^T W_j B_j - B_j^T W_j A_j (A_j^T W_j A_j)^{-1} A_j^T W_j B_j] \right\}^{-1}$$

— корреляционная матрица погрешностей оценки расхождений ШВ между i -й КС и ГКС.

В табл. 1 приведены результаты расчета ожидаемой точности определения координатно-временных параметров спутников СРНС и ГС для двух вариантов конфигурации сети КС. При расширении сети КС (вариант II) наблюдается значительное повышение точности оценки искомым параметров.

Следует отметить, что здесь рассмотрен точеч-

Таблица 1. Среднее квадратичное отклонение оценок координатно-временных параметров спутников СРНС и ГС

Вариант сети КС	СКО					
	координат спутников, ГС, м	СВС спутников, ГС, м/с	ухода ШВ спутников, м	скорости ухода ШВ спутников, м/с	ухода ШВ КС, мм	скорости ухода ШВ КС, мм/с
I	1.5—26.0	0.9—1.0	7.5—22	4.2—14.8	8—27	4—14
II	0.8—6.6	0.3—2.7	2—6.8	1.2—3.4	2—14	1—7

ный метод оценивания искоемых параметров. При использовании фильтрации измерений, применении моделей движения спутников СРНС и моделей, описывающих уход ШВ КС, возможно повышение точности определений примерно на порядок.

Несмотря на то, что погрешности определения эфемерид и уходов ШВ спутников СРНС сетью КС, расположенной только на территории Украины (вариант I), соизмеримы с погрешностями закладываемой в спутники СРНС эфемеридной информации, из-за сильной корреляции этих погрешностей формируемые потребителем дифференциальные поправки к псевдодальности и псевдоскорости обладают высокой точностью.

Оценка точности компенсации погрешностей эфемерид и уходов ШВ спутников СРНС у потребителя выполнялась согласно выражению

$$K_{s, \delta} = G K_{11} G^T,$$

где $K_{s, \delta}$ — корреляционная матрица погрешностей компенсации (остаточного вклада) эфемеридных и частотно-временных погрешностей спутников СРНС в псевдодальности и псевдоскорости, измеряемые потребителем; G — матрица производных измеряемых потребителем псевдодальностей и псевдоскоростей (с учетом рассчитанных и введенных интегральных дифференциальных поправок) по оцениваемым координатно-временным параметрам спутников СРНС.

Данные табл. 2 свидетельствуют о высокой точности компенсации эфемеридно-временных погрешностей спутников СРНС и ГС с использованием ДКИ сети КС. Существенное уменьшение этих погрешностей возможно, как сказано выше, при привлечении моделей движения спутника СРНС и поведения часов КС.

Результатирующие оценки погрешностей широкозонной дифференциальной коррекции эфемеридных и частотно-временных погрешностей спутников СРНС у потребителя, а также результирующие погрешности координатных определений с учетом ионосферных, тропосферных и флюктуационных

Таблица 2. СКО оценки точности компенсации координатно-временных погрешностей спутников СРНС и ГС

Вариант сети КС	СКО компенсации погрешностей измерений	
	в псевдодальности, м	в псевдоскорости, см/с
I	0.15	0.5—1.3
II	0.14	0.1

Таблица 3. Результирующие оценки координатных определений потребителя

Вариант сети КС	СКО навигационных определений потребителя	
	координат, м	СВС, см/с
I	1.30—2.10 (0.09—0.15)	0.70—1.2 (0.05—0.4)
II	1.30—2.10 (0.09—0.15)	0.70—1.10 (0.03—0.15)

Примечание. В скобках даны вклады остаточных погрешностей измерений потребителя после дифференциальной коррекции.

составляющих погрешностей потребителя представлены в табл. 3. При проведении расчетов размещение потребителя выбиралось в пределах территории Украины, а также выносилось за ее пределы на расстоянии от 200 км до 1000 км (в зависимости от варианта сети КС).

При расчетах предполагалось, что СКО погрешностей учета воздействия ионосферы в псевдодальности потребителя не превысит 1.8 м, тропосферы — 0.3 м, а СКО флюктуационной составляющей измерений навигационной аппаратуры потребителя с учетом фильтрации не превысит 1.0 м [4]. Суммарные погрешности измерений псевдодальности в аппаратуре потребителя соответственно равны 2.1 м, а СКО измерений псевдоскоростей — 0.5 см/с.

ВЫВОДЫ

Из полученных результатов следует, что национальная сеть ШДН позволит производить навигационные определения с погрешностями, не превышающими 2.6—4.2 м (2σ) по координатам и 1.4—2.4 см/с по СВС в любой точке Украины и прилегающих областей.

Реализация таких показателей точности позволит при реализации сети из 10—12 КС удовлетворить, как показывает анализ современных требований потребителей навигационного обеспечения, абсолютное большинство гражданских и военных потребителей. Только при решении специфических задач авиации (посадка по 2-й и 3-й категории),

флота (швартовка кораблей), железнодорожного транспорта (на специфических участках путей) и др. необходимо использовать локальные КС, размещая их в непосредственной близости от потребителя.

1. Жданок Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов.радио, 1978.—350 с.
2. Киналь Ю., Разумовский О. Доклад о навигационной деятельности в организации ИНМАРСАТ // Планирование глобальной радионавигации: Сборник тр. Второй Междунар. конф., 24—26 июня 1997 г. — М., 1997.—С. 91—100.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973.—831 с.
4. Космическая радиотехника и телеметрия (КРТ) // Навигация.—1989.—Сер. III.—№ 24 (446).
5. Сильвестров С. Д., Неволько Н. П., Кульнев В. В. Методы повышения точности навигационных определений потребителей при использовании космических разностно-дальномерных систем // Космич. исслед.—1986.—24, вып. 6.—С. 831—843.
6. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П. и др. Сетевые спутни-

ковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1993.—408 с.

7. Ashkenazi V., Chao C., Chen W., et al. High precision wide area DGPS // Proc. of the 5-th International Conference on Differential Satellite Navigational System, St. Peterburg, Russia, May 20-24, 1996. — St. Peterburg, 1996.—Vol. 1, paper N 8.

POSSIBILITIES FOR REALIZING IN UKRAINE A WIDE-AREA DIFFERENTIAL NAVIGATION USING THE GPS AND GLONASS SIGNALS

A. P. Vereshak, A. A. Zhalilo, I. G. Nozdrin, and S. N. Flerko

We analyse the possibilities for realizing a wide area differential navigation based on the GNSS-1 signals, as applied to comparatively small regions on the Earth's surface such as Ukraine. The accuracy of the differential corrections formed by the reference station network and the resulting accuracy are estimated at 1.3—2.1 m for the coordinates and 0.7—1.2 cm/s for the velocity, which corresponds to the GNSS-1 requirements.