

УДК 629.78

Баллистические аспекты возможностей реализации перспективных технологий спутниковой навигации

Лысенко Л. Н.^{1,*}, Корянов В. В.¹

[*kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru)

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводятся результаты анализа применимости отдельных технологий спутниковой навигации с точки зрения их баллистических аспектов, связанных с повышением точности навигационных определений. Основное внимание уделяется методу межспутниковых измерений при его использовании для расчета частотно-временных поправок (ЧВП) и уточнения эфемерид на его основе, а также обсуждению проблем реализации потенциальных преимуществ режима дифференциальной коррекции. Приводятся соображения, касающиеся целесообразности применения технологий комплексирования навигационных средств бортовыми средствами системы ориентации и стабилизации, а также астрооптическими средствами орбитального базирования.

Ключевые слова: спутниковая навигация, ГЛОНАСС, дифференциальная коррекция, межспутниковые измерения, автономная навигация

Введение

Определяющим элементом информационных ГЛОНАСС – технологий является эфемеридно-временное обеспечение (ЭВО), представляющие собой совокупность алгоритмов и технологий, направленных на формирование и передачу потребителям эфемеридной и частотно-временной информации в составе навигационного кадра.

Её получение основывается на проведении измерений текущих навигационных параметров (ИТП) как наземными так и бортовыми измерительными средствами.

При этом принято различать запросную технологию измерения дальностей и беззапросную технологию (БЗ-технологию) кодовых и фазовых измерений псевдодальностей.

Последняя, в силу ряда причин, является предпочтительной, и потому позиционируется как основная ГЛОНАСС-технология [1]. Тем не менее, и запросная технология не утратила своей значимости и продолжает широко использоваться при решении таких вспомогательных задач, как формирование ЭО резервных КА спутниковой

системы, либо КА системы при нестабильной работе бортового синхронизирующего устройства. Более того, её принято рассматривать как основную при постановке спутника в требуемую точку стояния, переводе спутника из одной рабочей точки в другую, удержания его в составе «созвездия».

Соответственно при реализации обсуждаемых технологий могут использоваться различные варианты их аппаратурного обеспечения. При всем возможном многообразии, они условно подразделяются на многопунктовые классические, многопунктовые комплексированные (включая варианты использования режима дифференциальной коррекции); однопунктовые (малопунктовые), в том числе, квазиоднопунктовые; системы на основе использования межспутниковых измерений (МСИ), комплексированные системы орбитального базирования.

Многопунктовые системы (технологии) предполагают применение территориально разнесенных измерительных средств (ИС) в составе соответствующих командно-измерительных систем (КИС), осуществляющих высокоточные запросные измерения дальностей.

Ограничения по относительному расположению ИС в этом случае связаны лишь с условиями геометрической видимости спутника и ИС КИС.

Эту технологию принято считать одной из высокоточных и надежных, но в то же время, наиболее экономически затратных.

В БЗ-технологиях вместо высокоточных измерений запросной дальности, обычно используются беззапросные измерения суммарной дальности, погрешности которых, как правило существенно выше. Кроме того, измерительные базы подобных сетей не могут быть слишком большими.

Однопунктовые технологии предполагают получение и обработку ИГНП от единственного ИС, входящего в состав КИС.

Проигрывая многопунктовым в универсальности, точности и надежности, однопунктовые технологии относятся к числу наиболее экономичных и удобных в эксплуатации при обеспечении навигации геостационарных спутников.

В квазиоднопунктовых (иногда их называют «полуторапунктовыми» [2]) измерения КИС комплексуются дополнительными измерениями высокоточных угломерных систем (фазовых пеленгаторов, наземных астрооптических средств, датчиков бортовых измерительных систем).

Стремление к повышению точности навигации с использованием спутниковых систем привело к созданию методик использования бортовой аппаратуры межспутниковых измерений для решения задач обмена информацией об измерениях кодовой последовательности, текущем положении спутника в системе по схеме «каждый с каждым», параметрах привязки бортовых часов к системной шкале времени и др. [3].

Наконец, различные измерительные средства орбитального базирования, прежде всего астрооптические, могут, если не в качестве самостоятельных, то как минимум в

качестве средств комплексирования, способствовать решению задач повышения точности, спутниковой навигации.]

Имея в виду изложенное, перейдем непосредственно к обсуждению проблем баллистико-навигационного обеспечения (БНО) реализации технологий, обычно относимых [2, 3] к числу перспективных.]

1. Баллистические аспекты реализации технологий межспутниковых измерений

Начиная примерно с 2007-08 годов существенное место в работах, направленных на повышение потенциальной точности навигации с использованием КНС «ГЛОНАСС» все в большей степени отводится решению проблем уточнения параметров движения и синхронизации шкал времени элементов КНС на основе технологий МСИ.]

Особенно большие надежды в этом ключе возлагаются на квантово-оптический (лазерный) вариант построения межспутниковых линий (МСЛ).]

Обычно, при обсуждении результатов соответствующих работ делается вывод, базирующийся на результатах компьютерного моделирования, что применение МСЛ при полной орбитальной группировке КА ГЛОНАСС позволит выйти в глобальном масштабе на субметровые уровни точности позиционирования.]

Не будем обсуждать здесь далеко не решенные пока проблемы возможностей точного наведения по угловому положению линии визирования бортовой аппаратуры в направлении на другой (ведомый) спутник, а тем более, совершенно не очевидные вопросы реализации автосопровождения ведомых КА при взаимодействии через МЛС, тем более для микро- и миниспутников.]

Решение этих проблем, как представляется, потребует не меньших, если не больших усилий, нежели, чем создание собственно бортовой аппаратуры МЛС.]

Не ставя под сомнение значимость и полезность результатов соответствующих исследований по технологиям МСИ, а тем более принципиальную полезность их практической реализации в варианте межспутниковой линии МЛНСС на аппаратах типа ГЛОНАСС-К2, выскажем, все же, некоторые, базирующиеся на анализе баллистических аспектов, сомнения в части возможной переоценки ожиданий от их использования.]

Наиболее полные и корректные научные результаты в обсуждаемой области получены в исследованиях А.К. Гречкосеева (см., например, [4]).]

С точки зрения БНО рассматриваемых технологий заслуживают внимания два подхода, существенно различающихся между собой:]

1. Использование для решения задач навигации КА, в частности для навигации геостационарных спутников, аппаратуры потребителей КНС ГЛОНАСС при беззапросных измерениях псевдодальности и псевдоскорости, а также содержащейся в кадрах радиосигналов информации с метками высокоточной шкалы времени, эфемеридами навигационного КА и альманахом системы.]

2. Применение межспутниковых измерительных средств для навигации СИСЗ, входящих в различные спутниковые системы в качестве элемента контура управления другими КА.

Первый подход, в свою очередь, подразумевает необходимость обсуждения [3] двух случаев:

1а) соответствующего использованию разрывного НП существующих СНС, в частности в районе стационара;

1б) «стандартного» варианта технологии межспутниковых измерений (МСИ) в условиях неразрывного НП, допускающего возможность декомпозиции задач уточнения эфемерид и параметров ухода бортовых часов как самостоятельные.

В случае 1а) использование стандартных методов расчета фазовых координат потребителя в геодезической (географической) СК на основе решения прямой навигационной задачи невозможно.

Поэтому здесь приходится ориентироваться на специальные методы решения задач БНО, базирующиеся либо на накоплении (на длительном интервале) сеансов с НКА с последующим решением прямой задачи, либо на накоплении достаточного количества «парных зон» (одновременной видимости с СИСЗ не менее двух НКА), имеющих место не менее 6 раз на каждом суточном витке СИСЗ [6]. Сведение данных всех таких сеансов к одному моменту времени при выборе в качестве измеряемой функции разности псевдодальностей до двух НКА, позволяет уменьшить требования к стабильности бортового стандарта часов до 10^{-6} по сравнению со стабильностью предшествующего метода (10^{-12}).

В случае 1б) имеем, практически, вариант проблем реализации существующих технологий наземного эфемеридно-временного обеспечения, ужесточенного необходимостью решения прямой навигационной задачи на борту КА.

Поскольку МСИ псевдодальностей не несут информации о текущей ориентации Земли, погрешности бортовых моделей параметров её вращения уточнены быть не могут. Отсюда вытекает вывод о единственно возможном корректном уточнении эфемерид по МСИ только в инерциальной системе координат, с последующим их пересчетом в земную связанную СК.

В «стандартном» варианте решения прямой навигационной задачи начальные условия и согласующие параметры бортовой ММД формируются в НАКУ по результатам обработки ИТПП НКА, проводимых наземными средствами. Обновляемые начальные условия закладываются на борт, как правило, дважды в сутки.

Увеличение периодичности «закладок» или их прекращение напрямую связано с увеличением длительности интервала прогноза эфемерид и существенным снижением их точности. На интервале 30 суток погрешность определения эфемерид может достигать сотен и даже тысяч метров.

Поскольку, на что уже обращалось внимание, по МСИ не могут быть рассчитаны уточненные данные ПВЗ, соответствующая задача должна быть возложена на алгоритм уточнения эфемерид по МСИ для заданного созвездия НКА.

Понятно, при этом, что бортовая модель движения НКА должна учитывать тот же набор возмущающих ускорений, что и опорная, используемая в баллистических центрах НАКУ. Очевидно, однако, что возможности наземных и бортовых вычислительных средств несоизмеримы. Отсюда приходится вынуждено ограничиваться учетом «главных» возмущений (типа влияния неучитываемых погрешностей гравитационного притяжения Земли, Луны и Солнца, а также радиационного давления солнечных лучей) по аналогичным с номинальной (наземной) моделью формулам, а остальные возмущающие факторы либо игнорировать вообще, либо учитывать в виде аппроксимирующих тригонометрических функций, образующих вектор параметров согласующей модели (для случая использования прецизионных прогнозирующих моделей).

Обычно предполагается, что обмен по межспутниковой радиолинии всех НКА, находящихся во взаимной радиовидимости, производится одновременно и мгновенно, что соответствует допущению об идеальности номинальных орбит всех НКА. Принимается модель «полных циклограмм», которые на самом деле не могут быть технически реализованы для всей орбитальной группировки, хотя бы в силу отсутствия видимости между антиподными в одной плоскости парами НКА.

Наконец, построение алгоритмов, предполагающих раздельное определение опорных эфемерид и неизвестных поправок к ним для каждого НКА, невозможно без осуществления линеаризации ММД возмущенного движения относительно, как предполагается, известного (на самом деле, точно неизвестного) «опорного» движения.

Не говоря уже о последнем из упомянутых обстоятельств, процедура линеаризации объективно приводит к получению моделей, весьма далеких от реальных по критерию адекватности (с погрешностью порядка 5% от номинальных значений). Бесспорно, перечисленные допущения и неточности, привносимые в процесс построения ММД, можно считать имеющими второй порядок малости по отношению к достигнутому («метровому») уровню точности решения навигационных задач. Что же касается «сантиметрового» уровня точности, они привносят, как минимум, тот же порядок погрешностей.

В связи с изложенным, следует относиться с исключительной осторожностью к оценке достоверности декларируемых заявлений в части достижения обсуждаемого уровня точности применительно к рассматриваемым здесь технологиям навигационных определений.

Более того, и «метровые» значения предельных отклонений оцениваемых характеристик погрешностей уточненных эфемерид, все чаще мелькающие в специальной отечественной литературе, вызывают весьма обоснованное недоверие.

Свободным от отмеченных недостатков в какой-то степени можно, пожалуй, считать лишь двухпараметрический бортовой алгоритм решения частотно-временной задачи по

МСИ расхождений шкал для «веерной схемы» по скользящему мерному интервалу при периодических коррекциях с использованием поправок от НАКУ.]

Однако, при этом следует учитывать два важных обстоятельства, требующих внимания при оценке эффективности данного подхода:]

- во-первых, его уже нельзя считать автономным, как не обладающим работоспособностью с требуемыми потребительскими свойствами без задействования линии связи «земля-борт»;

- во-вторых, данная технология представляется весьма высокзатратной, значительно уступающей по этому критерию альтернативным техническим решениям.]

Принципиально, конечно, не может вызвать сомнений достигаемость автономного уточнения частотно-временных поправок, когда при использовании «веерной» схемы МСИ на каждом НКА формируются вторичные измерения расхождений бортовой шкалы времени по каждому сеансу МСИ с расчетом оперативных добавок к опорным ЧВП на основе осреднения шкал в пределах частной веерной подгруппы. Однако в силу невозможности устранения дрейфа композитной (средней групповой) ШВ относительно наземной без обмена информацией с НАКУ, в конечном счете, метод, как уже отмечалось, теряет свойство автономности, со всеми вытекающими отсюда последствиями.]

Второй из указанных выше подходов получил распространение ещё во второй половине 70-х годов и относится к проведению первых экспериментов, связанных с осуществлением межспутниковых измерений между СИСЗ АТС-6 и низкоорбитальным КА GEOS-3 (США).]

Аналогичная технология использовалась и в отечественной практике при обработке межспутниковых измерений, выполняемых КИС «Квант-Р» через СР «Альтаир» [7].]

Обсуждаемая технология (наиболее совершенным вариантом реализации которой на сегодня, предположительно, является система TDRSS (США)), подразумевает осуществление двухэтапной процедуры уменьшения влияния ошибок навигации СИСЗ на точность навигационных определений КА.]

Первый этап связан с применением 2-3 КИС только для навигации СИСЗ при суточном интервале проведения сеансов измерений, непосредственно предшествующих сеансам межспутниковых измерений. На втором этапе осуществляется совместное уточнение параметров НКА и СИСЗ по данным МСИ.]

В окончательном варианте реализации данной технологии в качестве одного из НКА выступал геофизический спутник TOPEX/POSEIDON на орбите со средней высотой ~1340 км и наклоном ~66° с установленной на борту аппаратурой TDRSS. Требуемая точность навигации этого спутника обеспечивалась при совместном использовании сети наземных лазерных дальномеров и наземных доплеровских систем DORIS на 10-суточном интервале. При обработке проведенных запросных и беззапросных измерений дальности и относительной скорости между спутником TDRSS и КА TOPEX/POSEIDON параметры орбиты последнего не уточнялись. Уточнениям подлежали только параметры орбиты TDRSS. Другими словами, назначение КА TOPEX/POSEIDON в данной технологии]

определялось как вспомогательная «обслуживающая станция» [8], используемая при навигации спутника TDRSS по данным МСИ.

Применение подобной столь сложной и, к тому же, безусловно весьма затратной технологии, позволило по утверждению её разработчиков снизить ошибку определения положения спутника TDRSS до уровня СКО порядка 3м (да и то при значительном вкладе в это значение возможности исключения влияния ионосферных погрешностей). При этом навигация абонентов-потребителей, использующих информацию от спутников TDRSS (элементов СИСЗ), оценивалась на уровне СКО определения положения примерно в 6-15м. Это отнюдь не уровень «сантиметровых» точностей.

Очевидно промежуточную роль по отношению к двум рассмотренным подходам, следует отдать предложениям, связанным с непрерывным уточнением эфемеридного обеспечения КА ГНСС за счет использования дополнительного низкоорбитального КА (НиКА) с размещенной на его борту аппаратурой синхронизации БПВ с системной шкалой времени ГНСС, с навигационной аппаратурой потребителя, а также аппаратурой измерения доплеровского смещения частоты навигационного сигнала, излучаемого навигационным КА (см. патенты №№ 236/910, 2390/30 РФ, патентообладатель С.В.Стрельников (НПО «Орион»)). Постулируется возможность высокоточного определения параметров орбит КА ГНСС на борту НиКА по измерениям доплеровского смещения частоты сигнала навигационного сообщения и точно известным параметрам орбиты НиКА с последующим расчетом и передачей эфемерид от НиКА в бортовую аппаратуру КА ГНСС. При этом утверждается, что при продолжительности непрерывного мерного интервала в 45 мин и ошибке измерения скорости относительного движения НиКА и КА ГНСС, не превосходящей 1 см/с, СКО определения радиуса-вектора КА ГНСС будет иметь порядок 0,8 м.

Неочевидность назначения и возможностей практического воплощения в жизнь обсуждаемого проекта (идеи?), к сожалению, не дает оснований для квалифицированной оценки его декларируемых преимуществ.

2. Технологии БНО, ориентированные на решение задач автономной навигации спутниковых систем

Методы автономной навигации КА предполагают полное возложение функций по решению навигационной задачи на БКУ. Осуществление функций проведения, сбора результатов ИТП, решения задач навигации и выполнения других операций управления движением центра масс КА в замкнутом цикле, относится к числу наиболее радикальных способов решения многих задач навигации и поддержания состояния спутниковых систем, особенно военного назначения.

Заметим, что приводимые достаточно часто описания технологий автономной навигации на основе использования аппаратуры КНС, строго говоря, являются некорректными, поскольку КНС представляется внешней системой по отношению к автономно определяющемуся КА, к тому же, совершенно от него независимой. Не

относятся к числу автономных и интегрированные навигационные системы на базе все того же ГНСС-приемника.

Вопросы интеграции данных, в том числе и так называемой «глубокой интеграции» всех допустимых к использованию навигационных средств относятся к достаточно специфичным и требующим специального обсуждения.

Тем не менее, отметим, что теория автономной навигации на основе, прежде всего, астрономических позиционных измерителей, используемых в первую очередь в качестве бортовых оптических датчиков систем ориентации и стабилизации, получила к настоящему времени достаточно полное развитие.

Данные соответствующих датчиков могут преобразовываться, например, в углы между направлениями с КА на известную (например, Полярную) звезду и на геометрический центр Земли (угол ПОЗ), между направлениями на центр Солнца и центр Земли (угол СОЗ) и т.д. [9,10].

Указанные углы содержат информацию о положении КА в пространстве и практически не зависят от его текущей ориентации.

В качестве элементов орбиты и уточняемых параметров при решении соответствующих задач автономной навигации обычно используются так называемые «синхронный элементы», включающие:

- отклонение средней долготы от номинального значения;
- дрейф средней долготы (скорость её изменения);
- компоненты вектора эксцентриситета орбиты;
- компоненты вектора наклона орбиты.

Это позволяет обеспечить сохранение высокой обусловленности матрицы наблюдаемости при решении навигационной задачи в случае изменения составов измерений, а также длительности интервалов обработки навигационной информации в широких пределах.

С целью возможности сопоставления эффективности обсуждаемого подхода приведем ряд оценочных характеристик реализуемой технологии для случая удержания геостационарного спутника в области $\pm 0,1^\circ$ относительно номинальной точки стояния.

Достижение сопоставимых условий с решением навигационной задачи на основе использования однопунктной технологии, как установлено, может быть обеспечено в режиме автономной навигации на протяжении 384 суточного интервала при выполнении следующих уровней:

- 1) систематическая погрешность в определении углов СОЗ не должна превышать уровня $0,02^\circ$ (СКО);
- 2) систематическая ошибка реализации углов ориентации вектора тяги при выполнении маневра коррекции широты должна быть известна с погрешностью, не превышающей $0,2^\circ$;
- 3) длительность одного цикла ИТНП не менее 25 ч;

4) темп измерений – не менее 1 пары углов СОЗ и ПОЗ в час (т.е. через каждые 15° дуги орбиты).

Простое сопоставление этих условий с возможностями реализации известной технологии, принятой за прототип, свидетельствует об отсутствии конкурентоспособности обсуждаемого подхода, по крайней мере, на период его разработки.

Строго говоря, не могут быть отнесены к числу автономных и достаточно перспективные по мнению отдельных авторов и комплексированные технологии МСИ в сочетании с астроизмерениями взаимных (НКА-НКА) направлений с привязкой к звездному базису. К тому же следует иметь в виду, что данный тип технологий вряд ли может рассматриваться в качестве технических решений ближайшей перспективы.

Ожидания, касающиеся того, что автономные бортовые астроизмерители позволят устранить тренд композитного времени, выражаемый в периодических колебаниях отклонений средней бортовой шкалы времени, построенный по МСИ, от шкалы времени системы, очевидно, имеют право на существование. Однако, при этом, потребуется корректная оценка того, насколько вносимые усложнения технологии, а, следовательно, их экономические «утяжеления», окажутся обоснованными с точки зрения достигаемого положительного технического эффекта.

К числу не многочисленных перспективных областей применения методов автономной навигации для управления полетом как низкоорбитальных, так и геостационарных спутников, пожалуй могут рассматриваться лишь получившие развитие в последнее время методы «кластерного управления» группой спутников («Formation Flying»), а также управления созвездием геостационарных спутников при их удержании в окрестности одной точки стояния (случай коллокации) при поддержании в заданном диапазоне их взаимного расстояния относительно «ведущего».

3. Возможности и состояние разработок в области применения режима дифференциальной коррекции

Дифференциальный режим навигации является практически единственным подходом, действительно обеспечивающим возможность решения задачи существенного повышения точности навигации в обозримое время.

Однако, следует иметь в виду, что «возможность» не равносильна «способности».

Осуществление дифференциального режима (ДР) СРНС предполагает, как известно, использование как минимум двух спутниковых приемников или приемоизмерителей в виде контрольно-корректирующей станции, называемой часто «базовой станцией» и приемной станции потребителя. Базовая станция должна быть обязательно установлена в точке с точно известными географическими координатами. Только на основании сравнения известных координат (полученных в результате прецизионных измерений) с измеренными навигационными координатами, базовая станция сможет сформировать поправки, передаваемые потребителям по каналам связи. Таким образом, реализация ДР в

данном методе осуществляется посредством создания дифференциальных подсистем (ДПС) СРНС. Условно их принято подразделять на широкодиапазонные (ШДПС), региональные (РДПС) и локальные (ЛДПС). В качестве вариантов ШДПС могут рассматриваться широкозонные контрольные станции (ШКС) типа WAAS, EGNOS, MSAS, информация от которых передается на широкозонные главные станции (ШГС) с целью выработки общих поправок.

Радиус рабочей зоны ШДПС имеет порядок от 5000 км - 6000 км. Выработанные на ШГС корректирующие поправки передаются через наземные станции на геостационарный КА для последующей ретрансляции потребителям. Эти КА используются также в качестве дополнительных навигационных точек для дополнительных дальномерных измерений. Диаметр рабочей зоны РДПС обычно колеблется в диапазоне от 400-500 км до 2000 км и более км. ЛДПС имеют максимальные дальности действия порядка 20-200 км.

Если погрешности определения псевдодальностей слабо изменяются во времени и в пространстве, они существенно компенсируются переданными поправками. Для погрешности определения координат КА уровня 20 м, изменчивость определения псевдодальностей составляет сантиметры при разности расстояний около 100 км и десятки сантиметров при взаимных удалениях порядка нескольких тысяч км.

Существует несколько разновидностей ДР, которые в зависимости от типа и места коррекции, а также средств передачи корректирующей информации различают на:

- а) ДР с коррекцией координат;
- б) ДР с коррекцией относительных координат;
- в) ДР с использованием «псевдоспутников».

К числу наиболее известных широкодиапазонных систем дифференциальной навигации относятся системы WAAS (Wide Area Augmentation System) и WADGPS (Wide Area Differential GPS). В последней реализуется так называемый state-space approach метод (метод коррекции параметров моделей движения КА, параметров модели ионосферных задержек и смещений шкал времени навигационных спутников). Обе системы развернуты и эксплуатируются на территории США. По утверждениям разработчиков указанных систем точность местоопределения потребителей их информации гарантируется на уровне СКО около 0,5 м в области, охватываемой станциями сбора информации (ССИ) и смежных с ней областях, причем в WADGPS используется 15 ССИ, расположенных только на континентальной территории США, в то время как WAAS использует избыточное число из 24 ССИ, расположенных как на континентальной территории США, так и на Аляске и Гавайских островах. Государственная система WAAS за счет использования двух и более ГСИЗ, излучающих дополнительные дальномерные коды, обеспечивает по сравнению с WADGPS более строгие требования доступности.

Обе системы доводят до потребителя информацию об ионосферных задержках в виде карт вертикальных ионосферных задержек либо постоянной точности с шагом 2° (WADGPS), либо карт разной точности (WAAS). Наиболее подробные карты содержат до 929 «точек прокола ионосферы» (ionosphere pierce points). Скорость передачи

корректирующей информации в системе WADGPS составляет 750 бит/с, в системе WAAS ≈ 250 бит/с. Причем корректирующая информация в последней квантуется с дискретом 1/8 м, в WADGPS – с дискретом 1/16 м.

По своей структуре глобальные системы дифференциальной навигации (GDGPS) весьма схожи с широкодиапазонными системами. Они так же используют наземную сеть станций сбора информации и тот же метод формирования дифференциальных поправок. Отличие заключается в том, что исключение ионосферных ошибок в GDGPS производится путем использования двухчастотных измерений. При этом в процессе отработки метода использовалось 18 ССИ из порядка 60 станций всемирной глобальной сети GPS (Global GPS Network, GGN), принадлежащей NASA. В окончательном варианте разработчиками рекомендовано использовать до 30 станций в избыточном варианте, либо минимуму 12 станций, гарантированно оптимально расположенных по всей территории земного шара.

Предполагается, что шкала системного времени GDGPS привязана к системному времени GPS с точностью не хуже 50 нс. Временная стабильность сигнала ГИСЗ при этом оценивается на уровне 2·10⁻¹³ за сутки.

Европейская тройственная группа (ETG), объединяющая представителей Европейского космического агентства, Евроконтроля и Европейского сообщества, как известно, курирует создание ПДПС EGNOS на базе ГИСЗ связи Инмарсат III (в перспективе Artemis) с ретрансляцией навигационного сигнала, соответствующего сигналу поддиапазона L1GPS. Разработка EGNOS ведется с учетом возможностей её интеграции и унификации с аналогичными системами, прежде всего WAAS и MSAS, разрабатываемой в Японии.

По многочисленным утверждениям специалистов, применение режима дифференциальной коррекции GPS позволило уже на начало 2000 года выйти на уровень СКО радиальной нормальной и трансверсальной составляющих ошибок определения параметров орбит, соответствующих значениям примерно 0,6; 1,3 и 1,8 м. Указанные значения представляются вполне достоверными.

Понятно, что достижение аналогичного уровня точности для любой другой ГНС, в частности ГЛОНАСС, возможно лишь при наличии, хотя бы сходных предпосылок для достижения той же цели.

Дадим, в связи с этим, краткий анализ этих предпосылок.

Из изложенного выше следует, что к числу важнейших параметров, характеризующих точностные параметры решаемой задачи относится наземная геофизическая информация и сведения об ионосферных задержках сигнала. Не касаясь качества получаемой информации, отметим, что все позиционные наблюдения в РФ обязательно проводятся на двух частотах. Это, с одной стороны, позволяет учесть вклад ионосферы в задержку радиосигналов, с другой – проводить постоянный мониторинг ионосферы.

Для анализа следующего фактора необходимо вернуться к исходной посылке в части минимально необходимых условий построения дифференциальной системы спутниковой навигации, связанной с требованием высокоточного знания координат «базовой станции». Естественно возникает вопрос о том, чему численно должно соответствовать определение «высокоточное»?

Корректного ответа на этот вопрос в увязке с ожидаемой точностью ДР СРНС, строго говоря, нет и сегодня он вряд ли может быть получен.

Поэтому приходится ориентироваться на оценки представителей ИИА РАН, согласно которым ошибки итоговой погрешности навигационных определений с учетом требований к точности «перспективной ГНС ГЛОНАСС» за счет ошибок фундаментального сегмента КВО должны иметь, миллиметровый порядок знания координат, определяющих «привязку» базовых станций в земной системе. Напомни, что уровень точности знания координат НИПов на период полета первого человека в космос (апрель 1961г) определялся десятками метров для европейской части СССР, а для удаленных от европейской части – сотнями метров.

С тех пор, конечно, прошло много времени. Высокоточное определение координат опорных (базовых) наземных станций поддерживается и распространяется сегодня средствами РСДБ, радиотехническими средствами ГЛОНАСС/GPS, средствами лазерной локации ИСЗ.

Учитывая необходимость согласования системы координат КВНО с международной системой ITRF, опорные пункты наземного сегмента КВНО обычно предполагается целесообразным совмещать с действующими на территории России GPS станциями международной сети IGS, а также пунктами сети «Квазар-КВО» (Светлое, Зеленчукская, Бадары) и лазерными станциями в Комсомольске-на-Амуре, Подмосковье и на Алтае.

Учитывая современную международную ситуацию, рассчитывать на возможность использования станций GPS сети IGS вряд ли возможно.

Таким образом, из имеющихся сегодня в РФ

- 19 станций на территории страны,

- 4 зарубежных станций,

вряд ли наберется хотя бы половина из числа требуемых, характеризующихся миллиметровым уровнем точности определения их земных координат.

Что же говорить о планируемой перспективной сети станций комплекса сбора измерений на территории страны ближнего и дальнего Зарубежья?

Тогда, естественно, возникает мысль о том, что может быть миллиметровый уровень точности геодезической привязки базовых станций является избыточным, и к числу «точно определенных географических координат» могут быть отнесены координаты станций иного уровня точности?

Например, предусмотренные СК-95, в которой точность «привязки» пунктов характеризуется следующими СКО взаимного положения пунктов по каждой из плановых координат:

- 2-4 см – для смежных пунктов астро-гравиметрической системы (АГС);

- 0,3-0,8 м при относительных расстояниях от 1 до 9 тыс. км, нормальных высот, в зависимости от метода их определения;

- 6-10 см в среднем по РФ из уравнивания нивелирных сетей I и II классов;

- 0,2-0,3 м из астрономо-геодезических определений при создании АГС.

Точность определения превышения высот квазигеоида астрономо-гравиметрическим методом в СК-95 характеризуется следующими СКО:

- 6-9 см при расстояниях 10-20 км;

- 0,3-0,5 м при расстоянии 1000 км.

В соответствии с «Основными положениями о государственной геодезической сети» ГКИНП (ГНТА) – 01-006-03, М., 2004 и Федеральным законом №209-ФЗ (с изменениями) от 26 декабря 1995 г. достижение соответствующих требований и характеристик по ФЦП «Глобальная навигационная система», на основе новых высокоточных пунктов спутниковой сети планировалось завершение создания постоянно действующих дифференциальных станций, обеспечивающих определение координат потребителями в режиме, близком к реальному времени на сантиметровом уровне уже к 2011 году.

И хотя эти требования в полном объеме не выполнены даже на настоящее время, перспективы их достижения не кажутся фантастическими. Другое дело, окажется ли достаточным соответствующий уровень точности для ожидаемых точностных характеристик режима дифференциальной коррекции СРНС. Ответ на этот вопрос требует, очевидно, проведения самостоятельных исследований.

Заметим, что работы по геодезической привязке средств НКУ ГЛОНАСС в свое время проводились несколькими организациями: 29 НИИ, 4 ЦНИИ МО, ЦНИИ АиК. Каждая из них использовала свои собственные методики оценки точности привязки. При этом интересно отметить, что если методика 29 НИИ МО РФ показала для ОКК 4, 9, 14, 15, 20 уровень точностей привязки порядка сантиметрового уровня, методика 4 ЦНИИ в зависимости от типа используемых измерительных средств – на уровне десятков см (до 1 м для КИС), то методика ЦНИИ АиК (2000 года) – обеспечивала по утверждениям её разработчиков миллиметровый уровень точности. Понятно, что при таком разбросе оценок трудно говорить о реальной возможности согласования точности определения координат станций.

При этом, естественно остаются, нерешенными и вопросы реализации режима дифференциальной коррекции в областях разрывного НП. Однако, это уже вопросы более отдаленной перспективы.

Выводы

Изложенное дает основание для следующих выводов:

1. Алгоритмы формирования ЭВО различаются в зависимости от реализуемой информационно-измерительной технологии («запросной» или «беззапросной»).

Запросная технология определения эфемерид базируется на решении уравнений запросной дальности и не зависит от нестабильности бортового времени.

Беззапросные технологии (относящиеся к числу основных для современной ГЛОНАСС) осуществляются на основе коловых и фазовых измерений. Их особенностью является наличие в них информации не только о положении НИСЗ, но и о разности шкал времени измерителя и «борта».

2. Для всех существующих групп БЗ-технологий (на основе моделей ШВ в виде полиномов, в форме таблично-заданной функции на момент измерений, на основе разностных одномоментных измерений), расчёт ЧВП проводится при исключении из измерений геометрической дальности, вычисляемой по уточняемым эфемеридам, и всех поправок, за исключением ухода часов, и уточнения коэффициентов модели ЧВП по результатам уточнения коэффициентов шкал времени, полученных в общем решении. В любом случае результаты расчётов сопровождаются погрешностями и не должны восприниматься как абсолютно точные.

3. Поскольку существующие методы и алгоритмы расчёта эфемерид и ЧВП, реализуемые ЦУС ГЛОНАСС путём как запросных, так и БЗ-измерений не могут обеспечить требуемый перспективный уровень точности прогнозирования на длительных интервалах функционирования СНС, применение метода межспутниковых измерений (МСИ) для расчёта ЧВП и уточнения эфемерид на его основе является целесообразным.

4. Эфемериды, передаваемые в навигационном кадре, формируются на борту путём прогнозирования в инерциальной СК начальных условий движения КА при помощи бортовой ММД и последующего преобразования параметров движения в СК ПЗ 90.02.

МСИ позволяют уточнять значения эфемерид и, таким образом, уменьшить величину погрешности, обусловленной неадекватностью ММД и начальными параметрами движения в инерциальной СК.

5. При преобразовании измерительной информации от инерциальной СК к СК ПЗ 90.02, наличие МСИ не сказывается на возможности нивелирования соответствующих ошибок, снижающих точность навигации и таким образом, не является панацеей.

6. Перспективными следует считать технологии, предназначенные для автономной навигации СИСЗ, особенно при управлении созвездием спутников, удерживаемых в окрестности фиксированной точки стояния.

Однако, следует иметь в виду, что технологической основой БНО автономных, а тем более квазиавтономных методов, служат средства бортовой навигационной аппаратуры, в том числе и аппаратуры потребителя ГЛОНАСС.

Не говоря уж о микро- и миниспутниках, даже для КА стандартной конструкции и конфигурации, перенос места решения навигационной задачи с «земли» на «борт» в условиях необходимости существенного повышения уровня адекватности используемых математических моделей может оказаться далеко не простой задачей в силу несоизмеримых возможностей вычислительных комплексов НАКУ и БКУ.

7. Наиболее простым и достоверно гарантирующим способом повышения точности навигационных определений является использование дифференциального режима навигации. Однако, практические возможности реализации его потенциальных преимуществ в значительной степени ограничены в настоящее время, прежде всего в силу проблем с достижением прецизионной точности геодезической «привязки» базовых станций и их оптимальным расположением по поверхности Земного Шара.

Список литературы

1. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов. Монография / под ред. Л.Н. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 518 с.
2. Урличич Ю.М., Ежов С.А., Жолзипский А.И., Круглов А.В., Махненко Ю.Ю. Современные технологии навигации геостационарных спутников. М.: Физматлит, 2006. 271 с.
3. Современные и перспективные информационные ГНСС – технологии в задачах высокоточной навигации / под ред. В.А. Бартенева и М.Н. Красильщикова. М.: Физматлит, 2014. 275 с.
4. Гречкосеев А.К. Исследование наблюдаемости движения орбитальной группировки навигационной космической системы по межспутниковым измерениям дальности. Ч. I // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 2. С.116-130.
5. Гречкосеев А.К. Исследование наблюдаемости движения орбитальной группировки навигационной космической системы по межспутниковым измерениям дальности. Ч. 2 // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 3. С.122-131.
6. Аверин С.В. Разработка и исследование свойств адаптивного алгоритма определения координат искусственных спутников Земли по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS: дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 144 с.
7. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. В 2 ч. Ч. I / под ред. Л.Н. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 476 с.
8. Luthcke S.D., Marshall J.A., Cox C.V., Lemoine F.G., Rowlands D.D., Williamson R.G., Eddy W.F., Olson T.R., Pavlis D.E., Rowton S.C. Precision Orbit Determination Using IDRSS // Journal of Astronautical Sciences. 1997. Vol. 48, no. 3. P. 567-598.
9. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Профа, 2004. 544 с.
10. Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 176 с.

□

Ballistic Aspects of Feasibility for Prospective Satellite Navigation Technologies

L.N. Lysenko^{1,*} V.V. Koryanov¹

^{*}kafsm3@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: satellite navigation, GLONASS, differential correction, intersatellite measurement, autonomous navigation

When modeling the operating processes of ballistics and navigation support it is expedient to make decomposition of the general problem of coordinate-time and navigation support into the typical options of its engineering implementation.

As the satellite navigation technologies the paper considers inter-satellite measurement and autonomous navigation mode of differential correction. It also assesses the possibility of their application to improve the accuracy of navigation determinations.

Technologies using inter-satellite measurement tools such as GLONASS / GPS equipment, equipment of inter-satellite radio link, astro-optical space based devices are an independent class of navigation technologies.

However, each of these options has both advantages and disadvantages that affect the evaluation of the appropriateness and feasibility of their use.

The paper separately considers the problem of increasing survivability of space systems and conservation of ground control complex due to introduction of requirements to ensure the independent functioning of spacecraft and application of technologies of ballistics and navigation support, supposing to involve minimum means of automated ground control complex for these purposes.

Currently, there is a completely developed theory of autonomous navigation based on astronomical positional gauges, which are used as onboard optical sensors of orientation and stabilization systems.

To date, the differential navigation mode is, virtually, the only approach that can allow the solution of tasks in terms of increased accuracy, but with some restrictions.

The implementation of differential mode of treatment is carried out through the creation of differential subsystems of the satellite navigation systems. These subsystems are usually divided into wide-range, regional and local ones.

Analysis of ballistic aspects to implement discussed navigation technologies allowed us to identify constraints for improving accuracy to define consumers of the satellite navigation information.

References

1. Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V. *Teoreticheskie osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniya kosmicheskikh poletov* [Theoretical foundations of ballistics navigation support space missions]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 518 p. (in Russian).
2. Urlichich Yu.M., Ezhov S.A., Zhodzishskii A. I., Kruglov A.V., Makhnenko Yu.Yu. *Sovremennye tekhnologii navigatsii geostatsionarnykh sputnikov* [Modern technology navigation geostationary satellites]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 271 p. (in Russian).
3. Bartenev V.A., Krasil'shchikov M.N. *Sovremennye i perspektivnye informatsionnye GNSS – tekhnologii v zadachakh vysokotochnoi navigatsii* [Modern and perspective GNSS of information – technology in problems of high-precision navigation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 275 p. (in Russian).
4. Grechkoseev A.K. Study of observability of motion of an orbital group of navigation space system using intersatellite range measurements. Pt. 1. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 2, pp.116-130. (English version of journal: *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 2, pp. 293-308. DOI: [10.1134/S1064230711010102](https://doi.org/10.1134/S1064230711010102)).
5. Grechkoseev A.K. Study of observability of motion of an orbital group of navigation space system using intersatellite range measurements. Pt. 2. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 3, pp.122-131. (English version of journal: *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 3, pp. 472-482. DOI: [10.1134/S1064230711020067](https://doi.org/10.1134/S1064230711020067)).
6. Averin S.V. *Razrabotka i issledovanie svoystv adaptivnogo algoritma opredeleniya koordinat iskusstvennykh sputnikov Zemli po signalam sistem GLONASS i GPS. Kand. diss.* [Development and research of the properties of the adaptive algorithm of determining the coordinates of satellites by the signals of GLONASS and GPS. Cand. diss.]. Moscow, 1999. 144 p. (in Russian).
7. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami. V 2 ch. Ch. 1* [Control of space flights. In 2 pts. Pt. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 476 p. (in Russian).
8. Lutheke S.D., Marshall J.A., Cox C.V., Lemoine F.G., Rowlands D.D., Williamson R.G., Eddy W.F., Olson T.R., Pavlis D.E., Rowton S.C. Precision Orbit Determination Using IDRSS. *Journal of Astronautical Sciences*, 1997, vol. 48, no. 3, pp. 567-598.
9. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* [Ballistics and navigation of spacecrafts]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 544 p. (in Russian).
10. Zelentsov V.V., Kazakovtsev V.P. *Osnovy ballisticheskogo proektirovaniya iskusstvennykh sputnikov Zemli* [The fundamentals ballistic design of satellites]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 176 p. (in Russian).