

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ДРУГИХ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

*А. А. ЖАЛИЛО, А. И. ДОХОВ, Е. В. КАТЮШИНА, Е. М. ВАСИЛЬЕВА, А. И. ЯКОВЧЕНКО, О. А. ЛУКЬЯНОВА*

В статье представлены промежуточные итоги выполненных исследований и разработки высокоточной многопозиционной фазовой системы траекторных измерений (МФСТИ). В ходе работ выполнено обоснование реализуемости системы и проведена оценка достижимой точности определения траекторий космических аппаратов (КА) и приземных высокодинамичных летательных аппаратов. Представлено краткое описание построения и основных сегментов МФСТИ. Показано, что предложенный способ реализации системы позволяет достичь более высокой точности траекторных определений по сравнению с аналогами при минимальной стоимости разработки системы, её реализации и эксплуатации.

*Ключевые слова:* глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), ГНСС-технологии, космический аппарат (КА), летательный аппарат (ЛА), космический объект (КО), многопозиционная фазовая система траекторных измерений (МФСТИ), высокодинамичные объекты.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ многочисленных открытых источников информации свидетельствует о том, что за рубежом проводились и проводятся активные работы по поиску новых технологий, способов и средств точного позиционирования, определения параметров движения высокодинамичных объектов, включая средства выведения и навигации/управления космических аппаратов (КА) на заданных околоземных орбитах. В частности, существует и особая сфера – сфера траекторных измерений для проведения летных испытаний и отработки автономных (инерциальных и др.) систем управления высокодинамичных летательных аппаратов (ЛА) специального назначения. История создания и развития высокоточных радиотехнических систем траекторных измерений восходит от систем MISTRAM, AZUSA (США), ВЕГА (СССР) [1, 2]. В США с конца 1970-х годов на смену указанным весьма дорогим и сложным системам разрабатываются более дешевые и мобильные траекторные системы, использующие технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Так, для целей отработки систем управления межконтинентальных баллистических ракет морского базирования вводится в действие однопунктная корабельная система SATRACK, использующая ретранслированные с борта объекта одно- и двухчастотные сигналы GPS [3]. Непосредственное использование ГНСС-технологий и размещение соответствующих средств (полноценных спутниковых навигационных приемников) на борту контролируемых объектов (вместо ретрансляции спутниковых сигналов на пункт приема) также принципиально возможно и есть множество указаний на использовании ГНСС-приемников на борту высокодинамичных объектов в составе систем управления полётом, интегрированных со средствами инерциальной навигации, корреляционно-экстремальной навигации или астронавигации. Следует упомянуть и относи-

тельно новое развивающееся на Западе направление в технологиях точного позиционирования высокодинамичных объектов. Речь идет о многопозиционной наземной системе LOCATA (Австралия, США) [4], которая не использует сигналы ГНСС, но по принципу построения и функционирования соответствует выражению «GPS наоборот».

В Украине же в силу ряда объективных причин технологии в области траекторных измерений практически не развивались, хотя для космических приложений были осуществлены несколько проектов для низкоорбитальных КА. В настоящее же время возрастает актуальность и потребность создания эффективных высокоточных средств траекторных измерений для перспективных специализированных КА Украины [5] при их выведении и для навигации практически на всех околоземных орбитах с высотами до 36 тыс. км, включая области разрывного навигационного ГНСС.

Поэтому задача создания и исследования отечественной системы и технологий точных определений параметров движения КА и других высокодинамичных объектов, средств их независимого траекторного контроля в ходе летных испытаний является актуальной. Выполняемая в настоящее время в ХНУРЭ разработка высокоточной многопозиционной фазовой системы траекторных измерений (МФСТИ) отвечает этому направлению.

### 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МФСТИ

Для решения задачи создания МФСТИ с максимально возможными точностными характеристиками авторы предложили новую концепцию построения и функционирования системы, основанную на измерении необходимой совокупности параметров с помощью распределенного в пространстве радиотехнического комплекса, состоящего из подвижного бортового сегмента контролируемых объектов (КО) и наземного сегмента, которые образуют единую систему. Под-

вижной бортовой сегмент КО – бортовой приёмопередатчик/ретранслятор решает задачу приема широкополосных ГНСС-подобных трёхчастотных радиосигналов, передаваемых наземным передатчиком, их преобразования и излучения (с известным смещением частот для исключения интерференции) в дециметровом диапазоне волн в направлении сети наземных универсальных модифицированных приемников сигналов ЛА и сигналов ГНСС, образующие многопозиционный интерферометр. Одна из важнейших особенностей подхода к созданию МФСТИ заключается в достижении надежного разрешения фазовой неоднозначности разностей фазовых наблюдений наземных приемников сигналов высокочастотных КО и одновременно сигналов ГНСС с сантиметровой точностью. В таком случае погрешности оценивания направляющих косинусов КО (аналогов измерений углов – азимута и угла места) будут соответствовать заданным характеристикам на максимальных отдалениях КО от измерительных пунктов системы. Такая задача является новой, а подход к ее решению базируется на использовании разработанных авторами про-

екта новых методов и идей, которые прошли апробацию в ходе предыдущих исследований.

Концепция построения МФСТИ заключается в совместном использовании: 1) принципов построения и функционирования полигонных многопозиционных фазометрических систем типа MISTRAM, AZUSA (США), ВЕГА (СССР), 2) сигналов и технологий (модифицированных аппаратных и программно-математических решений) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), 3) сигналов и технологий SBAS (системы типа EGNOS (ЕС), WAAS (США)) – региональных широкозонных функциональных космических и наземных дополнений ГНСС. Концепцию построения и функционирования МФСТИ определения параметров движения и навигации КА отражает рис. 1.

Разрабатываемая система включает наземный сегмент и бортовой приёмопередатчик/ретранслятор ГНСС-подобных сложных фазоманипулированных сигналов на трех разнесенных на ~350–400 МГц несущих частотах в дециметровом диапазоне волн (~1,7–2,1 ГГц). Наземный сегмент включает:

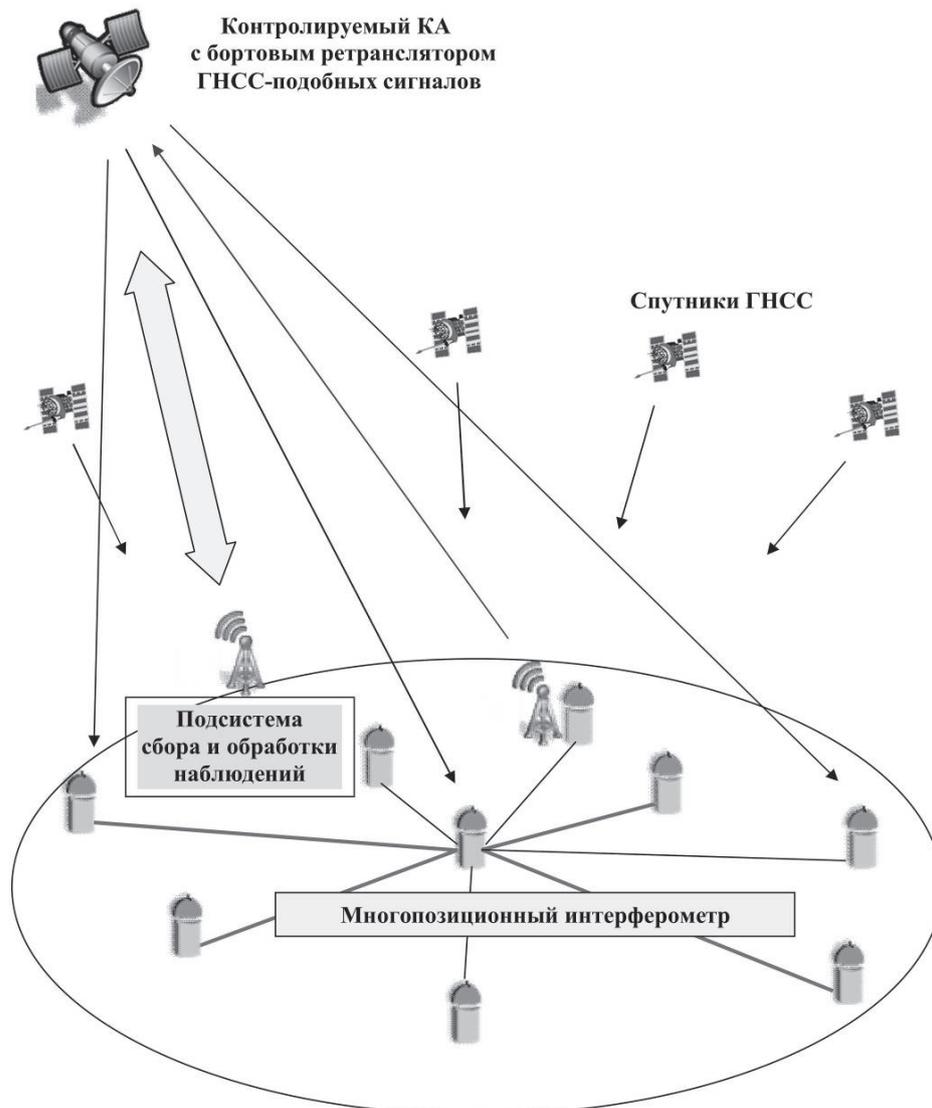


Рис. 1. Построение МФСТИ

а) передатчик измерительных/навигационных ГНСС/GPS-подобных сигналов (по типу SBAS) – дальномерный тракт;

б) многопозиционный фазовый интерферометр – разнесенные однопольные многоканальные специализированные приемники, принимающие и обрабатывающие сигналы ГНСС (для высокоточной координатной привязки фазовых центров приемных антенн и прецизионной синхронизации шкал времени приемников), и одновременно принимающие и обрабатывающие сигналы от наблюдаемых КО (L и S диапазонов), ретранслированных бортовыми приемопередатчиками КО;

в) центр сбора и обработки наблюдений МФСТИ.

В случае проведения измерений параметров движения КА, при необходимости, МФСТИ может быть на информационном уровне объединена с телеметрической станцией для передачи на борт КА сигналов управления движением, формируемых на основе результатов траекторных/навигационных определений.

Измеряемыми параметрами являются кодовые и фазовые наблюдения петлевой дальности на трассах «наземный передатчик – КО – приемники» и фазовые наблюдения разностей псевдодальностей на трассах «КО – разнесенные в пространстве приемники». Приемники сигналов ГНСС и контролируемых объектов должны образовывать интерферометр (с примерно перпендикулярными базами) и дополнительные, меньшие по величине измерительные базы для целей более надежного разрешения фазовой неоднозначности. Максимальные базы интерферометра между разнесенными приемниками МФСТИ могут составлять от ~100 км до ~1200 км (для территории Украины) при определении параметров траекторий КА в ближнем и дальнем космосе.

Рассматриваемая универсальная система предполагает модульный принцип построения с возможностью оптимальной реконфигурации системы под конкретные задачи для определения параметров движения конкретных КА/ЛА с возможностью быстрого развертывания и ввода в эксплуатацию в заданном районе. Обмен измерительной информацией между элементами системы и центром сбора и обработки для целей прецизионной координатной привязки и синхронизации разнесенных приемных модулей осуществляется с использованием Интернет либо иных средств. Следует также отметить необходимость калибровки инструментальных задержек в измерительных трактах аппаратуры МФСТИ и смещений фазовых центров антенн, т. к. в фазометрической системе учёт систематических погрешностей измерений является принципиально важным.

Предложенный принцип построения системы позволяет достичь наибольшей точности определения параметров траектории объекта, даже если расстояния до него существенно превышают размеры измерительных базисов, при условии, что измерения даль-

ности осуществляются с метровым уровнем точности, а измерения направляющих косинусов – с уровнем точности  $\sim 10^{-6} \div 10^{-8}$ . В этом случае погрешности определения текущих координат КА будут лежать в пределах  $\sim 0,1$  м – 1,0 м при определении параметров движения на удалениях от  $\sim 200$  км до  $\sim 40$  тыс. км. В случаях, когда размеры измерительных базисов МФСТИ будут соизмеримы с расстояниями до КО, без значимой потери точности могут использоваться только высокоточные интерферометрические измерения разностей расстояний (без использования кодовых измерений петлевых дальностей). В этом случае бортовая аппаратура КО может работать в режиме «свистка» без запроса от наземного передатчика, что будет соответствовать схеме «GPS наоборот».

Отличительная особенность построения и функционирования разрабатываемой бортовой аппаратуры (БА) состоит в том, что она должна принимать один запросный сигнал от одного наземного передатчика, а излучать в направлении приемных пунктов три когерентных между собой ГНСС-подобных сигнала (должна соблюдаться и кодово-фазовая когерентность) на разнесенных частотах с одной и той же модулирующей псевдослучайной последовательностью (ПСП) – одним и тем же кодом, как в глобальной навигационной спутниковой системе ГЛОНАСС. Такая схема построения БА позволяет выполнять траекторные определения параметров движения нескольких объектов одновременно. БА каждого из контролируемых объектов должна излучать «ответы» (три указанных выше сигнала) на одних и тех же частотах для экономии частотного ресурса. БА каждого из одновременно контролируемых объектов должна осуществлять кодирование трех ответных фазоманипулированных ГНСС-подобных сигналов псевдослучайными ортогональными последовательностями (ПСП, кодами), уникальными для БА каждого из контролируемых объектов. Кодовое разделение сигналов дает возможность в наземных приемниках осуществить различение (идентификацию) и отдельную оценку параметров принимаемых сигналов в блоках цифровой обработки, сэкономить частотные ресурсы и применить при разработке приемников хорошо отработанные технологии приема и обработки ГНСС-сигналов. Для случая космических приложений на КА допустимо предположение о возможности установки двух антенн – принимающей запросный сигнал и передающей ответные сигналы.

Наземные приемники должны разрабатываться с учетом одного и того же принципа/технологии одновременного приема и обработки как сигналов ГНСС, так и сигналов от контролируемых объектов. Использование при создании МФСТИ уже наработанных и апробированных ГНСС-технологий как в аппаратной части, так и в части программно-математического обеспечения – это одно из ключевых преимуществ предложенного принципа построения МФСТИ в це-

лом, приводящее к весьма значительному удешевлению и сокращению сроков разработки системы.

## **2. РЕЗУЛЬТАТЫ АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КА И ДРУГИХ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

С использованием разработанных модели погрешностей наблюдений и алгоритмов априорной оценки точности (АОТ) МФСТИ получены оценки ожидаемой точности КА и других высокодинамичных объектов для различных вариантов построения и функционирования системы. Априорная оценка точности определения параметров движения КА проведена для низких, средних и высоких орбит. При этом использовались различные конфигурации МФСТИ с максимальными базовыми расстояниями от ~700 км до ~1100 км. Ниже представлены итоговые обобщенные результаты АОТ траекторных определений КА и приземных высокодинамичных ЛА.

Оценочные значения среднеквадратических погрешностей определения параметров движения КА находятся в пределах:

– от несколько сантиметров до  $20 \div 30$  сантиметров по координатам и от нескольких миллиметров в секунду до  $2 \div 3$  сантиметров в секунду – для низкоорбитальных КА на высотах до ~1000 км);

– от  $0,25 \div 0,6$  м (в плане) до  $0,4 \div 1,2$  м (по высоте) по координатам и от  $2 \div 4$  см/с (в плане) до  $3,6 \div 18$  см/с (по высоте) по составляющим вектора скорости – для среднеорбитальных и геостационарных/геосинхронных КА (на высотах  $19 \div 36$  тыс. км).

Оценочные значения среднеквадратических погрешностей определения параметров движения приземных (до высот  $150 \div 200$  км) высокодинамичных ЛА находятся в пределах  $0,05 \div 0,40$  м по координатам и  $0,5 \div 1,6$  см/с по составляющим вектора скорости.

Предложенная концепция МФСТИ и рассмотренные пути реализации системы, как показали исследования, позволит достичь более высокой по сравнению с аналогами точности определений параметров траекторий летательных и космических аппаратов на любых высотах в диапазоне до 36 тыс. км при минимальной стоимости разработки системы, её реализации и эксплуатации.

## **3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МФСТИ**

1. Проведенные расчеты показали, что при принятых исходных данных требуемые энергетические соотношения радиолиний МФСТИ полностью удовлетворяются и обеспечивают работоспособность системы.

2. Предложенная универсальная структурная схема бортовой аппаратуры подтвердила возможность её технической реализации, необходимой для выполнения задач МФСТИ. Предлагаемая аппаратура позволяет обеспечить необходимый уровень выходной

мощности передатчика, заданную чувствительность приемного устройства, необходимую полосу слежения с учетом доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала.

Показана возможность технической реализации разрабатываемой наземной аппаратуры, необходимой для выполнения задач МФСТИ. Представлены основные принципы построения и функционирования разрабатываемой наземной аппаратуры МФСТИ.

3. Представлены результаты предварительной проработки структуры программно-математического обеспечения МФСТИ для совместной обработки наблюдений параметров сигналов от контролируемых объектов и сигналов ГНСС и определения параметров движения (координат и составляющих вектора скорости) контролируемых объектов в условиях высокой динамики изменения параметров принимаемых сигналов.

4. Определены этапы разработки МФСТИ, произведена оценка ориентировочной стоимости ОКР (~2,2 млн. у.е.), сроков её выполнения (~2,5 года) и стоимости изготовления комплекта образца системы при мелкосерийном производстве. Оценочная стоимость одного комплекта серийного образца МФСТИ составляет  $140,0 \div 160,0$  тыс. у.е. в зависимости от предназначения и исполнения системы. Предложен состав кооперации организаций Украины для выполнения ОКР.

## **ВЫВОДЫ**

1. Предложена новая концепция построения траекторной измерительной системы (МФСТИ) на основе сочетания принципов построения многопозиционных фазометрических систем и современных ГНСС-технологий точного позиционирования.

2. Определены архитектура и принципы функционирования сегментов МФСТИ, которая предполагает модульный принцип построения с возможностью оптимальной реконфигурации под конкретные задачи с возможностью быстрого развертывания и ввода в эксплуатацию в заданном районе.

3. МФСТИ является альтернативой всем рассмотренным аналогам траекторных измерительных систем (бортовые навигационные приемники GPS (ГНСС), система SATRACK, система LOCATA), обладает высокой точностью, соответствует современным передовым зарубежным технологическим решениям или даже превосходит их. Для КА, движущихся на средних и высоких орбитах, когда определение параметров движения по сигналам ГНСС затруднено или невозможно из-за разрывности навигационного поля, МФСТИ может стать единственной системой, обеспечивающей определение параметров движения КА с заданной точностью.

4. Определены этапы разработки МФСТИ, произведена оценка ориентировочной стоимости ОКР, сроков её выполнения и стоимости изготовления комплекта образца системы.

## Литература

- [1] Range Instrumentation, Ernest H. Ehling, Published by Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1967, 634 pp.
- [2] *Лутус Ю.П., Малафеев Е.Е., Михайлов Ю.В.* Высокоточная многопараметрическая система внешнетраекторных измерений параметров движения летательных аппаратов «ВЕГА» // Прикладная радиоэлектроника. – 2006. – Том 5, № 4. – С. 448–453.
- [3] *Thompson T., Levy L.J., Westerfield E.E.* The SATRACK System: Development and Applications // Johns Hopkins APL TECHNICAL DIGEST, Volume 19, Number 4 (1998), pp.436-447.
- [4] Craig Desiree L. LOCATA Corporation. USAF's New Reference System. Truth on the Range // Inside GNSS, № 3, May/June 2012, pp. 37-48.
- [5] *Зайцева А.Ю., Маслей В.Н., Галабурда Д.А., Белоусов К.Г., Москалев С.И., Зайцев С.С., Шовкопляс Ю.А.* Электрореактивный буксир для межорбитальной транспортировки космических аппаратов // Космична наука і технологія. 2015. – Т. 21, № 5. – С. 24–27.

Поступила в редколлегию 8.12.2017



**Жалило Алексей Александрович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: высокоточное позиционирование и навигация по сигналам ГНСС.



**Дохов Александр Иванович**, кандидат технических наук, профессор, заместитель проректора по научной работе ХНУРЭ. Область научных интересов: радиолокация, спутниковая навигация



**Катюшина Елена Владимировна**, старший научный сотрудник НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС.



**Васильева Елена Михайловна**, кандидат технических наук, директор Центра электромагнитных измерений, Национальный научный центр «Институт метрологии». Область научных интересов: радиотехника, приборы и устройства СВЧ-диапазона, радиолокация.



**Яковченко Александр Иванович**, старший научный сотрудник НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: высокоточное позиционирование и навигация по сигналам ГНСС.



**Лукьянова Ольга Алексеевна**, научный сотрудник НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС.

УДК 621.391.629.7

**Розробка високоточної системи визначення траєкторій космічних апаратів та інших високодинамічних об'єктів** / О.А. Жалило, О.І. Дохов, О.В. Катюшина, О.М. Васильєва, О.І. Яковченко, О.О. Лук'янова // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2017. – Том 16, № 3, 4. – С. 112–116.

В статті наведено проміжні підсумки виконаних досліджень і розробки високоточної багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ). В ході робіт виконано обґрунтування можливості реалізації системи та проведено оцінку досяжної точності визначення траєкторій космічних апаратів (КА) і приземних високодинамічних літальних апаратів. Подано стилістичний опис побудови і основних сегментів БФСТВ. Показано, що запропонований спосіб реалізації системи дозволяє досягти більш високі точності траєкторних визначень порівняно з аналогами при мінімальній вартості розробки системи, її реалізації і експлуатації.

*Ключові слова:* глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), ГНСС-технології, космічний апарат (КА), літальний апарат (ЛА), космічний об'єкт (КО), багатопозиційна фазова система траєкторних вимірювань (БФСТВ), високодинамічні об'єкти.

Іл. 1. Бібліограф.: 05 найм.

UDC 621.391.629.7

**Development of a high-precision system for determining trajectories of spacecraft and other high-dynamic objects** / Zhailo A.A., Dokhov A.I., Katiushina E.V., Vasileva E.M., Yakovchenko A.I., Lukyanova O.A. // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2017. – Vol. 16, № 3, 4. – P. 112–116.

The paper contains preliminary results of the performed studies and the development of a high-precision multi-position phase system of trajectory measurements (MPSTM). In the course of the work the feasibility of the system was justified and an assessment of the achievable accuracy of determining the trajectories of space vehicles and near ground high-dynamic flying vehicles was made. A brief description of construction and main segments of the MPSTM is presented. The proposed method of the system realization allows achieving a higher accuracy of trajectory determinations in comparison with the analogues at a minimum cost of the system development, its implementation and operation.

*Keywords:* Global Navigation Satellite System (GNSS), GNSS-technologies, spacecraft, aircraft, space object, multi-position phase system of trajectory measurements (MPSTM), high-dynamic objects.

Fig. 1. Ref.: 05 items.