

Баллистические проблемы синтеза орбитального сегмента спутниковых систем информационного обеспечения на основе малых и сверхмалых космических аппаратов

© Л.Н. Лысенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведен аналитический обзор основных баллистических проблем синтеза орбитального сегмента спутниковых систем (СС) информационного обеспечения на основе малых космических аппаратов (МКА). Существенное внимание уделено разработке концепции оценки возможности универсализации СС МКА. На основе рассмотрения постановки задачи синтеза баллистической структуры СС как парето-оптимальной системы показано, что интеграция систем МКА возможна главным образом в пределах одного или только «родственных» классов СС. С учетом тенденций развития классических тяжелых образцов космической техники в системах как гражданского, так и двойного назначения сформулированы требования к точности технологий баллистико-навигационного обеспечения (БНО) СС КА (в том числе и МКА) различного целевого назначения. Рассмотрены проблемы использования межспутниковой навигации и баллистических аспектов реализации технологий межспутниковых измерений. Переход от систем тяжелых КА к СС МКА требует решения совокупности инновационных задач, связанных как с конструированием отдельных КА, так и с адаптационной перестройкой БНО их систем.

Ключевые слова: спутниковые системы, информационное обеспечение, малые космические аппараты, синтез орбитального сегмента, структура спутниковой системы, системно-баллистические характеристики, баллистико-навигационное обеспечение, межспутниковые навигационные измерения, локальная группировка (кластер), инновационные технологии.

Классификация и концепция создания малых космических аппаратов. В соответствии с установившейся терминологией космические аппараты (КА) массой менее 1 т называют мини-спутниками или малыми КА (МКА), массой не более 100 кг — микроспутниками, до 10 кг — наноспутниками, до 1 кг — пикоспутниками. В отличие от малых все последующие КА, как правило, относят к сверхмалым.

Условность подобной классификации очевидна. Ее хоть каким-то логическим обоснованием может служить лишь тот факт, что соответствующие классы спутников последовательно отстоят один от другого по массе на порядок.

Отсутствие строгости в определениях используемых квалификационных признаков привело к достаточно вольной интерпретации их

различными авторами. В частности, в ряде случаев вводится дополнительный подкласс «легкие спутники» (массой 500...1000 кг), а к мини-спутникам (малым спутникам) относят только КА массой 100...500 кг. Более того, представители группы компаний «Спутникс» полагают, что к мини-спутникам следует относить исключительно КА, масса которых менее 150 кг. Суть, однако, от подобной терминологической «вольницы» не меняется. Концепция создания МКА изначально заключалась в реализации новой идеологии разработки и использования КА, принципиально отличной от традиционной, ранее существовавшей. Она заключается в значительном снижении стоимости и сроков изготовления (за счет отказа от универсализации и повышенной надежности), а также стоимости и возможного сокращения времени выведения КА на орбиту, например за счет использования легких носителей, в частности конверсионных либо утилизируемых боевых межконтинентальных баллистических ракет (МБР), а также применения схем сопутствующего выведения при профилльных запусках одной ракетой-носителем (РН) основных по назначению (тяжелых) КА.

Возможность создания такого типа МКА обусловило развитие электроники и вычислительной техники, гарантировавшее реализацию принципа микроминиатюризации, и, кроме того, стремление к коммерциализации космической деятельности, являвшейся на начальной ее стадии исключительно прерогативой государственных структур и организаций.

Действительно, разработку и производство МКА в принципе способны осуществить не только крупные аэрокосмические концерны, пользующиеся значительной государственной поддержкой, но и сравнительно небольшие частные компании, стремящиеся не только к получению государственных заказов на разработку комплектующих, но и нацеленные на формирование полного пакета услуг по созданию, поддержке, управлению, запуску и страхованию МКА, а также обучению и подготовке национальных кадров развивающихся государств, желающих самостоятельно осваивать космос. Таким образом, следует констатировать, что первоначально микроминиатюризация космической техники преследовала прежде всего коммерческие интересы.

По истечении определенного времени обнаружилось, что число частных западных компаний, действующих на этом сегменте рынка, крайне ограничено. Без значительной государственной поддержки развитие этого направления оказалось достаточно проблематичным. Следует отметить, что в СССР в тот период времени частного сектора экономики, заинтересованного и способного к соответствующей деятельности, не существовало.

В целом при всей неоднозначности итогов данного этапа он оказал позитивное влияние на развитие космической отрасли, заключающееся в приобретении опыта практического использования инновационных технологий, а также более компетентной и обоснованной оценки места и задач анализируемого подхода. Показательным примером может служить динамика анализа перспектив применения МКА в качестве спутников военного назначения, проведенного Агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (DARPA) в рамках программы F6 (*Future, Flexible, Fractionated, Free-Flying Spacecraft United by Information Exchange* — «Быстрые, гибкие, разделенные свободно-летающие космические аппараты будущего, объединенные системой информационного обмена») [1]. Работа над этой программой была начата в 2006 г. и первоначально рассматривалась в качестве средства инновационной «прорывной» технологии создания «роя сверхумных малых военных спутников», способной в корне изменить идеологию построения космического эшелона обороны США. Основным разработчиком была определена корпорация Orbital Sciences. Однако вскоре контракт с этой корпорацией в том глобальном виде, в котором он изначально заключался, был разорван и трансформирован в совокупность частных контрактов, направленных на создание и экспериментальную отработку с использованием МКА ключевого элемента проекта в виде системы спутниковой коммуникации, позволяющей осуществлять взаимодействие КА СС различного назначения. В результате программа свелась к проверке и экспериментальной отработке технически сложных концепций, реализация которых была сопряжена с высокими рисками, применительно к корректно обоснованным и планомерно реализуемым проектам, в частности по программам ALASA и Phoenix. Первая из них предполагает совершенствование и удешевление запуска группировки 24 (по некоторым сведениям, 29) МКА слежения системы SeeMe, вторая — осуществление непосредственно на орбите инспекции, ремонта и восстановления вышедших из строя или исчерпавших ресурс спутников, прежде всего геостационарных спутников связи.

Поскольку Россия оказалась вовлеченной в решение проблем микроминиатюризации значительно позже основных конкурентов (США, Великобритания, Япония, Китай и др.), несмотря даже на наличие предложений отдельных известных специалистов и существующих конкретных разработок [2, 3], до последнего времени отсутствовала единая отечественная концепция создания и применения МКА. При этом диапазон мнений до сих пор колеблется от позиции «не является ли провокацией призыв к миниатюризации в космической технике» [4] до утверждения, что «... идея создания “роя” таких

(малых) спутников, которые самообучаются, взаимодействуют друг с другом, передают команды, — это новый шаг в развитии отечественной космонавтики» [5].

Новизну данного направления, имея в виду проект США десятилетней давности, снятый с разработки как неэффективный и недостаточно обоснованный при затратах на подготовку его осуществления на уровне порядка 250 млн долл. США, обсуждать не будем. Отметим лишь, что при столь широком диапазоне мнений истина должна лежать, судя по всему, где-то посередине.

Актуальным в свете начавшегося в специализированных средствах массовой информации [6] обсуждения научно-технических проблем применения МКА при развертывании отечественной системы Воздушно-космической обороны (ВКО) является анализ баллистических проблем синтеза орбитальных систем информационного обеспечения с использованием МКА с учетом общетеоретических основ создания СС широкого назначения и существующей практики их построения на базе классических «тяжелых» образцов космической техники, используемых в системах гражданского и двойного назначения.

Прежде чем приступить к анализу представляется необходимым сформулировать перечень основных задач информационного обеспечения средств ВКО, ориентируясь, хотя и не на однозначные, но многочисленные мнения специалистов, высказываемые в открытых публицистических и научно-технических изданиях (см., например, [6, 7]).

Задачи спутниковых систем информационного обеспечения и целевое назначение работы. Результаты ряда успешно выполненных экспериментов на основе применения МКА позволяют утверждать, что к настоящему времени сложились условия для построения на их основе орбитальных группировок (структур) для решения широкого круга задач информационного обеспечения, в том числе в интересах ВКО. Вместе с тем данный тезис должен вызвать множество вопросов, начиная с элементарных (почему группировок, а не единичных, независимо функционирующих МКА; о каких классах группировок идет речь; могут ли сочетаться группировки МКА с существующими глобальными и региональными системами на основе средних и тяжелых КА и т. д.) до сложнейших, касающихся проблем структурной и параметрической оптимизации орбитальных группировок с учетом их целевого назначения, допустимой степени унификации и тем более универсализации систем МКА и т. п. Причем если для получения ответа на первый ряд вопросов достаточно вдумчивого и внимательного ознакомления с существующими стереотипными учебными изданиями (см., например [8, 9]), то второй — требует объемных исследований, проводимых квалифицированными специалистами достаточно широкого профиля. Однако не все задачи реша-

ются так просто. Примерами могут служить: разработка спутниковой системы «Вулкан», которая была начата в 2005 г. (ее дальнейшее развитие «Канопус-Вулкан» (Канопус-В) планировалось в 2015 г. и продолжает разрабатываться в настоящее время); возникшие сложности с принятием к разработке и созданию группировок МКА по программам «Обзор» и «Смотр»; презентация ОАО «Спутниковая система «Гонец» на Международном военно-техническом форуме «Армия-2015» (в части имеющегося опыта и перспектив широкого внедрения разработок и т. д.).

Одной из главнейших задач является задача космической разведки. К настоящему времени накоплен значительный опыт создания и эксплуатации КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) — систем двойного назначения. Однако это КА оптико-электронной разведки, аппаратуру которой на МКА установить невозможно, так как ее масса пропорциональна диаметру бортового телескопа, а системы монолокации требуют слишком большой мощности системы бортового электропитания. Создать космическую систему, удовлетворяющую по периодичности обзора подстилающей поверхности, из КА с массой в несколько тонн каждый (типа «Ресурс-П») невозможно.

Возникает предположение, что если будет решена проблема создания миниатюрного оборудования радиотехнических либо многоспектральных разведывательных систем высокого разрешения повышенной эффективности, появится возможность создания СС заданной периодичности обзора с необходимым числом МКА в ее структуре. Но при этом возникает следующий вопрос: как получаемую на орбите информацию своевременно доставлять потребителю? Без наличия привязки этой информации к единой шкале времени и главным образом без создания эффективной системы межспутниковой системы связи она будет оставаться «вещью в себе».

Для информационного обеспечения войск требуется решить не только проблемы оперативной передачи разведывательной информации, но и наладить связь подразделений в районе военного конфликта, а также глобальную связь удаленных войсковых группировок с центральным пунктом управления.

Причем, с одной стороны, существует положительный опыт создания глобальной системы связи на основе геостационарных СС, с другой — имеющийся отечественный и зарубежный опыт свидетельствует, что соответствующие проблемы сравнительно просто решаются за счет использования низкоорбитальных спутниковых систем связи. Необходимо установить, какой из известных систем должно быть отдано предпочтение и нужно ли это делать.

Следующая, не менее важная, чем предшествующие, задача связана с совершенствованием на основе МКА системы контроля космического пространства (СККП). В рамках ее решения может быть

обеспечено значительное по отношению к наземной инфраструктуре расширение космического эшелона СККП при отсутствующей в настоящее время возможности наблюдения орбит с наклоном менее 30° и доведением временной периодичности обзора всего космического пространства до нескольких десятков или даже нескольких минут за счет использования перекрестных (перекрывающихся) полей наблюдения.

Сопутствующей задачей следует считать обнаружение пусков гиперзвуковых летательных аппаратов потенциального противника, а также формирование целеуказаний отечественным средствам перехвата.

Наконец, должны быть решены задачи глобального метеоконтроля в районах ведения боевых действий и передислокации войск, а также контроля состояния ионосферы для повышения точности ГЛОНАСС и загоризонтных средств системы ВКО.

Этим далеко не исчерпывается перечень задач информационного обеспечения, но в первом приближении их можно рассматривать как приоритетные. Решение подавляющего большинства задач невозможно без решения соответствующих навигационных задач, например, это касается задач целеуказания, формирования полетных заданий МБР и исходных данных в маршрутные карты крылатых ракет без навигационного обеспечения потребителей соответствующей информации, поставляемой ГЛОНАСС. Необходимо установить возможность комплексирования этой основной сетевой системы вспомогательными (глобальными и (или) региональными) системами на базе МКА, степени их совместимости не только применительно к аппаратурному оснащению, но и баллистико-навигационному обеспечению (БНО).

Первым из числа определяющих вопросов является вопрос о допустимом уровне универсализации систем МКА. В среде отдельных военных экспертов установилось мнение, что при всем многообразии задач информационного обеспечения средств ВКО в принципе можно создать такую единую универсальную многоспутниковую группировку МКА, которая позволила бы одновременно решать задачи глобальной связи, всеобъемлющей оперативной разведки театра военных действий (ТВД) и околоземного космоса, полного контроля внешней среды, навигационного обеспечения и целеуказания средствам ВКО.

Насколько это реально, пока неизвестно. В данной работе также невозможно дать однозначный и исчерпывающий ответ на поставленные вопросы.

По мнению автора, предлагаемой информации будет достаточно, чтобы посчитать, что поставленная в работе цель — анализ существующих баллистических проблем синтеза орбитального сегмента СС на основе МКА — достигнута.

Предпосылки разработки концепции оценки возможности универсализации систем МКА различного назначения. В качестве целевого показателя применения комплекса средств наблюдения для системы КА и для каждого средства в отдельности принято использовать так называемый коэффициент достоверности информации, определяемый отношением площади района, сканируемой в течение фиксируемого интервала времени, к показателю разрешающей способности средства наблюдения, выраженного минимальной площадью классифицируемого с заданной вероятностью объекта-цели. Однако задавать указанный показатель произвольно нельзя, поскольку выбор наиболее рациональной структуры орбитального сегмента конкретной СС должен проводиться на основе удовлетворения требуемой совокупности системно-баллистических характеристик (СБХ). Последние включают в себя не только системные характеристики (СХ), задаваемые вектором \mathbf{P} и выражающие качество (степень пригодности) соответствующего орбитального построения с точки зрения его использования по целевому назначению СС, но и собственно параметры орбитального построения (баллистические характеристики) СС, вводимые с помощью кеплеровых элементов орбиты. В общем случае эллиптических орбит они представляют собой $(2N+4)$ -мерный вектор

$$\mathbf{S}_N = \{\mathbf{S}_j\}, \mathbf{S}_j = (a, e, \omega, i, \Omega_j, u_j) \quad (j = 1, \dots, N), \quad (1)$$

где a, e, ω, i — большая полуось, эксцентриситет, аргумент широты перигея и наклонение орбит спутников соответственно; Ω_j, u_j — долгота восходящего узла и аргумент широты j -го спутника.

Кеплеровы элементы в виде первых четырех компонентов определяют тип используемых орбит, в качестве которых могут быть выбраны квазикруговые солнечно-синхронные, геосинхронные, геостационарные, высокоэллиптические локально стационарные орбиты и др.

Параметры Ω_j и u_j задают орбитальную или фазовую структуру СС. Ее следует определять в рамках одного или нескольких известных классов структур, с которыми связаны формальные закономерности и правила расчета этих параметров, например в классах кинематически правильных СС, спутниковых цепочек, одномаршрутных, регулярных маршрутных СС и др.

Таким образом, в каждом конкретном случае используются СБХ, описываемые вектором

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_N, \mathbf{P}). \quad (2)$$

В свою очередь, СХ, являющиеся по своей сути критериальными показателями оценки качества орбитального построения СС,

целесообразно подразделять на целевые и косвенные [10]. Целевые СХ ($P_{ц}$) как непосредственный показатель эффективности применения СС наиболее объективно отражают степень пригодности орбитального построения СС для выполнения целевой задачи. В общем случае выбор компонентов вектора \mathbf{P} , а тем более подразделение их на целевые и косвенные проектные характеристики СС, представляет собой неформализуемую процедуру. Она является тем более сложной в случае, когда полная совокупность компонентов этого вектора, что характерно для большинства информационных систем, не может быть декомпозирована. В частности, это происходит при отнесении к числу косвенных СХ ($P_{к}$) таких характеристик, как различные площадные и пространственные вероятностные оценки размеров обслуживаемых участков земной поверхности или космического пространства, предельные характеристики бортовой аппаратуры, запас характеристической скорости для проведения коррекции орбит (если он предусмотрен) и т. д.

Задача баллистического проектирования СС в наиболее общем виде будет при этом заключаться в определении оптимального вектора $\mathbf{S} = \mathbf{S}_{\text{опт}}$ СБХ, соответствующего минимуму $N = N_{\text{min}}$ необходимого числа

$$N = N(\mathbf{S} | \mathbf{W}) \quad (3)$$

спутников в системе при обеспечении изменения вектора СБХ в заданной допустимой области S_n при известном векторе технических параметров СС

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(P_{ц}, P_{к}). \quad (4)$$

Данная задача может быть представлена в формализованном общем виде:

дано \mathbf{W} , \mathbf{S} ; требуется найти $\mathbf{S}_{\text{опт}} = \arg \min_s N(\mathbf{S} | \mathbf{W})$ и $N_{\text{min}} = N(\mathbf{S}_{\text{опт}} | \mathbf{W})$

при $\mathbf{S} \in S$, где S — целевая функция.

В данной постановке задача относится к классу задач синтеза парето-оптимальных систем. Поиск решения при этом осложняется многофакторностью условий, определяющих движение спутников по орбитам, наличием взаимоисключающих ограничений на функционирование бортовых систем, а также необходимостью учета физических явлений и процессов, имеющих случайный, а в ряде случаев и неопределенный характер.

Поэтому с методической точки зрения процесс баллистического проектирования СС в каждой конкретной ситуации будет итерационным, с большим количеством ветвящихся вариативных процедур.

В рамках рассматриваемой постановки ограничимся «нулевым приближением» на уровне принципиальной постановки задачи обобщенного анализа. Пусть сформулировано техническое задание на

разработку универсальной системы МКА информационного назначения, ориентированной на решение полной совокупности рассмотренных выше задач.

Оптимизируемый вектор СБХ должен включать в себя как минимум (подчеркнем — как минимум) три составляющих:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3 + \dots, \quad (5)$$

где \mathbf{S}_1 — целевой показатель эффективности СС; \mathbf{S}_2 — целевой показателей характеристик обзора земной поверхности и околоземного пространства; \mathbf{S}_3 — показатель динамической устойчивости СС, характеризующий способность сохранения параметров орбит и относительного положения спутников в системе под воздействием возмущающих факторов в течение определенного периода (полного, либо в пределах интервала между проведением коррекций) ее функционирования.

Отличительной особенностью такой задачи будет то, что целевая функция \mathbf{S} не позволяет осуществить реализацию без значительных упрощений какой-либо известной математической процедуры для отыскания ее локальных экстремумов и тем более глобального.

Использование метода прямого перебора и анализа выборки вариантов (размерности k) вектора \mathbf{S} , получаемых в ходе решения частных задач баллистического проектирования СС — задач на экстремум более простых функций, — в этом случае неприемлемо вследствие невозможности корректного обоснования объективно выделяемых для отбора вариантов (эквивалент назначения весовых коэффициентов при свертке векторного критерия к скалярному), с одной стороны, и «проклятия» размерности — с другой.

В результате остается возможность применения методов последовательной оптимизации — метода последовательных уступок и его частного случая — метода главного критерия.

Как известно, суть метода главного критерия заключается в том, чтобы выделить один (главный) критерий \mathbf{S}^I , а на остальные наложить только некоторые ограничения, потребовав, чтобы они были не меньше (больше) каких-то заданных значений. При этом задачу многокритериальной оптимизации можно сформулировать как задачу нахождения условного экстремума вида

$$\mathbf{S}_{\text{опт}} = \arg \left\{ \text{ext} \mathbf{S}^I (\mathbf{S}_N, \mathbf{P}) \mid \mathbf{S}_i \leq C_i, i = 1, \dots, m \right\}. \quad (6)$$

Следует отметить, что подобный подход с физической точки зрения эквивалентен предположению, что из рассматриваемой совокупности векторных критериев как минимум один является предпочтительным по отношению к остальным, что противоречит исходной постановке задачи. Если применять методы последователь-

ной оптимизации, приходим к варианту построения СС конкретного типа (не универсального), пусть даже и с учетом возможностей учета ограничений на составляющие вектора технических параметров СС типа (4), не входящих в состав компонентов главного вектора S^I .

На основе изложенного, нельзя утверждать, что решение задач синтеза универсальных СС МКА в принципе невозможно, однако соответствующая проблема весьма близка к проблеме «создания вечного двигателя». Косвенным свидетельством этого, очевидно, может служить и то, что подавляющее большинство оценок требований к точности технологий БНО перспективных СС обычно приводится раздельно для систем различного целевого назначения.

Требования ближайшей перспективы к точности технологий БНО СС. Применение перспективных СС различного назначения обуславливает повышенные требования к точности БНО их функционирования. В таблице приведены [11] обобщенные характеристики требований к точности математических моделей движения (ММД), влияющих на точность определения и прогнозирования орбит КА (в том числе МКА) различного назначения (в эквивалентной максимальной ошибке дальности до КА, м).

Обобщенные характеристики требований

Тип орбиты (высота над поверхностью Земли), км	Интервал ИТНП, сут	Ошибки прогнозирования, м	
		Краткосрочный прогноз	Долгосрочный прогноз
$h < 200$	0,005...0,010	0,010...0,050	0,20...0,80
$200 < h < 20\ 000$	0,001...0,020	0,003...0,050	0,02...1,50
$h > 20\ 000$	0,010...0,050	0,100...0,300	0,50...2,50

Переход на разработки и, главное, практическое применение единой модифицированной космической платформы (например, «Карат-200») под МКА, тем более в случае оснащения их двигателями малой и сверхмалой тяги, может изменить уровень требований, предъявляемых к их БНО. Поскольку применение двигателей, тяга которых находится в диапазоне значений 1...10 г, целесообразно лишь на орбитах, где возмущения, обусловленные суммарным влиянием внешних сил, соизмеримы с приведенными значениями тяги. Но в этом случае и отклонения подлежащих измерениям (определениям) параметров орбит оказываются сверхмалыми, требующими существенного, практически на порядок, ужесточения требований к точности БНО полета таких КА.

Для перспективных средств наблюдения и разведки, функционирующих на орбитах высотой 200...3500 км, прогнозируемая точность параметров движения по положению на моменты работы спецпаратуры должна быть повышена для высокоточной привязки наблюдаемых объектов к карте местности как минимум на порядок.

Отдельного обсуждения предполагает проблема сохранения ресурса средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) за счет введения тактико-технических требований по обеспечению автономного функционирования МКА и применению технологий БНО, предусматривающих минимальное задействование для этих целей средств НАКУ.

Переоснащаемые в настоящее время средства НАКУ позволяют (или позволят уже в ближайшей перспективе) осуществлять измерения параметров орбит КА на высотах 200...40 000 км с точностью (по уровню предельной ошибки) по дальности 1,0...30 м и радиальной скорости 0,001...0,003 м/с. Такие точности вполне достаточны для высокоточных навигационных определений большинства существующих типов КА, в частности, для удержания спутников связи типа «Экспресс-А» в допустимой области $\pm 0,05$ уг. град относительно номинальной точки стояния, но они могут оказаться недостаточными для решения отдельных задач на основе применения МКА.

Проблемы использования межспутниковой навигации и баллистические аспекты реализации технологий межспутниковых измерений. Создание на орбите распределенной полезной нагрузки, размещаемой на МКА, образующей локальную ограниченную группировку (ЛОГ) (кластер), так же как и управление любой целостностной глобальной или региональной системой МКА повышенной эффективности, возможно лишь при создании межспутниковой системы связи и решении достаточно широкого круга задач межспутниковой навигации на основе существующих и перспективных методов межспутниковых измерений (МСИ).

Несмотря на то что соответствующая аппаратура, средства связи в виде сетей всевозможных топологий с пакетной или потоковой передачей информации, главным образом на основе стандарта IEEE 802.15.4, частично прошли успешную экспериментальную апробацию, повышение требований к точности БНО и средствам измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) обуславливает повышение требований к средствам юстировки и метрологического контроля, к которым в первую очередь относятся квантовые оптические генераторы (КОГ).

Решение соответствующих задач может быть обеспечено при гарантированной точности ИТНП КОГ, не превышающей по уровню предельной ошибки порядка единиц сантиметров. Это реализуемо, но требует практического обеспечения.

Следует отметить, что технологической основой БНО в процессе квазиавтономного функционирования любой СС является, помимо МСИ, получение данных о движении КА с помощью бортовой навигационной аппаратуры (НАП) ГЛОНАСС.

Применительно к мини-, а тем более микроспутникам, данное обстоятельство представляет собой технически нерешенную проблему. Однако даже и для КА «стандартной» конструкции и конфигурации перенос места решения навигационной задачи с «земли» на «борт» в условиях необходимости существенного повышения уровня адекватности используемых ММД может оказаться непростой задачей вследствие несоизмеримых возможностей вычислительных комплексов НАКУ и БКУ.

При несомненной значимости и полезности результатов проведенных исследований по технологиям МСИ, а также принципиальной полезности их практической реализации в варианте межспутниковой линии МЛНСС на аппаратах типа ГЛОНАСС-К2, следует признать на основе анализа баллистических аспектов возможность переоценки ожиданий от их использования.

С точки зрения БНО предлагаемых технологий рассмотрим два подхода, существенно различающихся между собой.

1. Использование для решения задач навигации КА, в частности для навигации геостационарных спутников, НАП ГЛОНАСС при беззапросных измерениях псевдодалности и псевдоскорости, а также содержащейся в кадрах радиосигналов информации с метками высокоточной шкалы времени, эфемеридами навигационного КА и альманахом СС.

2. Применение МСИ для навигации аппаратов, входящих в различные СС в качестве элемента контура управления другими КА, что особенно актуально для вариантов кластерного построения ЛОГ.

Первый подход подразумевает необходимость обсуждения двух случаев:

а) использование разрывного навигационного поля существующих спутниковых радионавигационных систем;

б) «стандартного» варианта технологии МСИ в условиях неразрывного навигационного поля, допускающего возможность декомпозиции задач уточнения эфемерид и параметров ухода бортовых часов.

В случае а) использование стандартных методов расчета фазовых координат потребителя в геодезической (географической) системе координат (СК) на основе решения прямой навигационной задачи невозможно. Поэтому здесь приходится ориентироваться на специальные методы решения задач БНО, базирующиеся на накоплении (на длительном интервале) сеансов по навигационным КА с последующим решением прямой задачи либо на накоплении достаточного числа «парных зон» (одновременной видимости не менее двух КА).

В случае б) реализация существующих технологий наземного эфемеридно-временного обеспечения ужесточается необходимостью решения прямой навигационной задачи на борту КА.

Поскольку МСИ псевдодальностей не несут информации о текущей ориентации Земли, погрешности бортовых моделей параметров ее вращения (хотя бы на существующем уровне неопределенности фундаментального координатно-временного обеспечения) не могут быть уточнены. Отсюда следует вывод о единственно возможном корректном уточнении эфемерид по МСИ только в инерциальной СК с последующим их пересчетом в земную СК. В «стандартном» варианте решения прямой навигационной задачи начальные условия и согласующие параметры бортовой ММД формируются в НАКУ по результатам обработки ИТНП, проводимых наземными средствами. Обновляемые начальные условия закладываются на борт, как правило, дважды в сутки.

Увеличение периодичности «закладок» или их прекращение связаны с увеличением длительности интервала прогноза эфемерид и существенным снижением их точности. На интервале 30 сут погрешность определения эфемерид может достигать сотен, а в ряде случаев тысяч метров, что абсолютно недопустимо.

Поскольку уточненные данные параметров вращения Земли (ПВЗ) по МСИ определить нельзя, следует использовать алгоритм уточнения эфемерид по МСИ для заданного созвездия КА. При этом бортовая ММД в принципе должна учитывать тот же набор возмущающих ускорений, что и опорная, используемая в баллистических центрах НАКУ. Но, как отмечалось, возможности наземных и бортовых вычислительных средств, тем более МКА, несоизмеримы по производительности и объему памяти.

Отсюда следует, что придется учитывать «главные» возмущения (типа влияния неучитываемых погрешностей гравитационного притяжения Луны, Солнца и других планет, 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), что, безусловно, является предпочтительным, но также не идеальным вариантом решения.

Предполагается, что обмен по МСИ всех КА, находящихся во взаимной радиовидимости, производится одновременно и мгновенно, что соответствует допущению об идеальности и точной известности параметров номинальных орбит всех навигационных КА. Принимается модель «полных циклограмм», которые на самом деле не могут быть технически реализованы для всей орбитальной группировки вследствие отсутствия видимости между антиподными в одной плоскости спутниковых навигационных систем парами КА.

Наконец, построение алгоритмов, предполагающих раздельное определение опорных эфемерид и неизвестных поправок к ним для каждого спутника, невозможно без осуществления линеаризации ММД возмущенного движения относительно, как предполагается, известного (на самом деле, точно не известного) движения по опорной орбите.

Таким образом, линеаризация приводит к загроблению моделей. Перечисленные допущения и упрощения ММД можно считать имеющими второй порядок малости по отношению к достигнутому (метровому) уровню точности решения навигационных задач, но для планируемого сантиметрового уровня точности порядок погрешностей уже оказывается неприемлемым.

В связи с изложенным, следует критически оценивать достоверность декларируемых заявлений в части достижения обсуждаемого уровня точности применительно к типовым, известным и реализуемым в настоящее время технологиям навигационных определений.

Критерии перехода к созданию и эксплуатации СС МКА. Отдельного обсуждения заслуживают предложения по использованию больших высоко-производительных КА в мирное время для формирования опорных баз данных. При осуществлении перехода к пополнению (наращиванию) группировок КА за счет запуска дополнительных МКА в особый (т. е. предвоенный) период. Подобная идея представляется малопродуктивной и в принципе исключает возможность и целесообразность создания самостоятельных автономных СС КА в любой период.

При подобных предложениях естественно возникает вопрос, как следует относиться в этом случае, например, к СС связи типа «Иридиум» (*Iridium*), являющейся, как известно, единственной глобальной коммерческой системой связи, начальный этап эксплуатации которой датируется 1998 г., а ограниченно штатный — 2001 г. Указанные периоды не относились к числу предвоенных. Система широко используется не только гражданскими потребителями (по данным 2008 г., ее сервис насчитывал 285 000 абонентов), но и Министерством обороны США.

Существующая группировка СС в настоящее время включает в себя 66 спутников (изначально планировалось 77), обращающихся по 11 низким квазикруговым орбитам на высоте над поверхностью Земли порядка 780 км. Масса каждого спутника составляет примерно 700 кг, т. е. система относится к классу СС МКА. Отметим при этом, что СС «Иридиум» возникла в условиях существования глобальной системы связи США с использованием геостационарных систем «тяжелых» спутников, создаваемых в период и в интересах обеспечения управления и связи с воинским контингентом при

проведении боевых действий во Вьетнаме [12]. Таким образом, должен быть сделан вывод о том, что соответствующий критерий необходимо задавать все же в классе критериев, определяющих возможность нахождения компромисса вида «цена—качество» либо «полезность—стоимость», в соответствии с положениями работы [8].

Рассмотрим, в чем заключается сущность подхода к оценке обоснованной возможности перехода к идеологии МКА на базе критерия «полезность—стоимость». Техническую полезность СС предлагается оценивать некоторым скалярным показателем, характеризующим только основную целевую характеристику соответствующей системы, а ее стоимость — векторным показателем, включающим затраты на создание и эксплуатацию системы.

При этом в качестве $P_{ц}$ можно использовать приводимое выше понятие достоверности информации, а в качестве основного его числового показателя — коэффициент достоверности информации Можяева [13]. Тогда представляется возможным свести решаемую задачу к двухцикловой, на первом этапе которой решается задача оценки пригодности системы по скалярному показателю, на втором — оптимизационная задача минимизации расходов на основе отобранного множества средств с учетом показателя «стоимость».

Если в результате сравнения полученные числовые значения окажутся существенно меньше сопоставимых значений по времени и условиям создания действующей системы, из этого еще не следует необходимость замены одной системы другой (либо необходимость модернизации существующей системы). Однако подобный путь решения задачи может представляться целесообразным. Суть в том, что переход от больших и тяжелых конструкций к малым и легким на основе принципа микроминиатюризации не сводится только к решению задачи масштабирования, как это часто пытаются представить. В большинстве случаев данный подход должен сопровождаться инновационными разработками, результаты которых предвосхитить заранее невозможно.

Для лучшего понимания существа вопроса приведем конкретный пример результатов разработки МКА семейств «Руслан» и «Кентавр» совместного проекта АО ВПК «НПО машиностроения», ЛОНИИР ГУП (С.-Петербург), Информационного космического центра «Северная Корона» и 16 ЦНИИ МО, предназначенных для создания группировок как на высокоэллиптической, так и геостационарной орбитах [3, 14].

Включение в существующую группировку СС данных МКА обеспечивает охват сетевой системой связи и вещания при трех-, четырехкратном перекрытии зон радиовидимости при углах места на КА более 40...50°. Они могут найти эффективное применение также

в рамках создания проектов самостоятельно эксплуатируемых систем регионального типа.

Сформулируем основные проблемные вопросы практики замещения традиционных СС связи и вещания системами МКА. Возможности их практического использования зависят, как обычно, от ТТТ к ним.

Одним из наиболее существенных недостатков МКА является малая эффективность использования выделенных частотных и энергетических ресурсов. Это связано с ограниченными возможностями типового состава бортового оснащения бортовых комплексов управления (БКУ) тяжелых КА, а также с жесткими ограничениями по массовым характеристикам платформы и полезной нагрузки.

Важными ограничениями являются требования по обеспечению точности угловой ориентации и стабилизации, возможности коррекции орбиты, а также срока активного существования спутников системы. Следует также учитывать необходимость эффективного использования выделенного радиочастотного ресурса, связанного с требованием использования многолучевых крупноапертурных антенных систем, диаметр которых в ряде случаев может достигать 12 м и более.

Таким образом, синтезированный критерий технической полезности в течение многих лет исключал возможность даже постановки задачи замещения МКА тяжелых КА на высоких эллиптических и геостационарных орбитах. Предпочтительными представлялись варианты использования МКА на низких орбитах (СС «Иридиум», «Гонец» и др.), где требования к платформе и бортовому оснащению являются существенно менее жесткими. Кроме того, применимы гравитационные и аэродинамические системы стабилизации, относительно невысокая точность которых вполне достаточна для данных систем МКА. Наконец, малая высота орбит не требует применения крупноапертурных (габаритных) антенных систем. Значительная часть СС могла не иметь к тому же средств коррекции орбиты.

Создание СС МКА для замещения систем тяжелых КА геостационарного типа и типа «Молния» оказалось возможным только после разработки новых инновационных технологий.

В рамках проекта «Руслан» вследствие микроминиатюризации приборного состава БКУ и применения инновационных технологий сеточных развертываемых бортовых антенных систем, а также универсальной платформы с электрореактивными двигателями для довыведения спутника на высоты геостационарной орбиты разработаны МКА с приемлемым значением критерия технической полезности. Точность угловой трехосной ориентации и стабилизации МКА «Руслан-ММ» обеспечивается на уровне не ниже $0,1^\circ$ при времени активного существования на орбите 10...12 лет (при предельных 5...7 лет для низкоорбитальных СС связи и вещания).

В реализации проекта СС связи «Кентавр» использовалось еще более значительное число инновационных разработок. Его основу составляет базовый сегмент из фазированных четырех спутников, развернутых в одной орбитальной плоскости на геосинхронной высокоэллиптической орбите. Вместо трехосной ориентации используется система стабилизации вращением. Наличие закрутки спутника относительно продольной оси позволяет развернуть и поддерживать в стабильном состоянии тонкоплечную антенную систему, практически не содержащую жестких элементов конструкции.

Следует отметить инновационность баллистического проектирования СС проекта «Кентавр» в варианте построения региональной системы. Стандартным вариантом баллистического обеспечения региональных систем связи является использование геостационарной орбиты ($a = 42\ 164$ км, $h_a = h_{п} = 35\ 793$ км, $i = 0$, $T = 24$ ч). Однако дальнейшее наращивание и широкое использование геостационарной орбиты в последнее время все в большей степени сдерживается высокой концентрацией на них эксплуатируемых СС и низкими значениями углов места при обслуживании северных территорий, нарушающих устойчивую работу СС в городских условиях и на пересеченной местности. Это обусловило выбор инновационных псевдостационарных орбит проекта «Кентавр», относящихся к классу высокоэллиптических локально стационарных орбит.

При использовании СС из четырех МКА в данном случае достигается возможность включения бортовой аппаратуры только при нахождении спутника в верхней петле «восьмерки» трассы. При этом в момент синхронного переключения ретрансляционных комплексов направления от абонента на восходящий и нисходящий спутники совпадают. Синхронное переключение бортовых ретрансляторов, расположенных для абонента на одной линии визирования, создает эффект дрейфа спутника на псевдостационарной орбите без скачкообразного изменения его положения. Вследствие малого значения угловой скорости дрейфа МКА относительно потребителя достигается снижение требований к динамическим характеристикам системы сопровождения.

Таким образом, сегмент из четырех спутников воспроизводит две псевдостационарные позиции на орбитах «Кентавр», смещенные по долготе на 180° и расположенные на высотах 32 000...40 000 км в широтном поясе $59...64^\circ$ северной или южной широты.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Существующие тенденции в области космического аппаратостроения свидетельствуют о целесообразности использования малых и сверхмалых КА при создании перспективных систем информационного обеспечения.

Очевидными преимуществами применения МКА следует считать небольшие сроки их разработки и запуска, возможность использования для восполнения действующих СС при обеспечении скрытного запуска из любой точки земного шара (в том числе и с использованием подвижных ракетных комплексов) с помощью РН шахтного, морского и воздушного базирования при высокой оперативности подготовки к запуску, эффективное использование для отработки принципиально новых инновационных технологий, в частности в военно-промышленном комплексе.

2. Малые спутники по определению не являются многоцелевыми, как правило, в них реализуется принцип монофункциональности (один МКА — одна полезная нагрузка). В результате формирование многоспутниковых орбитальных группировок МКА, осуществляемое для повышения частоты просмотра обслуживаемой области, а также живучести системы, обуславливает создание узкоспециализированных СС.

3. Применительно к современному этапу создания ВКО наиболее технически подготовленными представляются узкоспециализированные СС разведывательного назначения (аналогом которых могут служить СС ДЗЗ двойного назначения, а также тросовые космические системы) и СС связи, как низко-, так и высокоорбитальные. Каждый из указанных вариантов построения СС используется в общей структуре систем информационного обеспечения.

4. Интеграция СС МКА возможна главным образом в пределах одного или родственных классов СС, например систем связи и управления, систем разведки и мониторинга окружающей среды и т. п.

Можно, конечно, ссылаясь на не вполне качественные переводы обзоров военных экспертов США, говорить о планируемом американцами объединении частных специализированных СС в единую сеть, «включающую более 200 спутников, привлекаемых для обеспечения боевых операций на возможном ТВД», однако все же следует иметь в виду, что речь в них идет не о создании некоей универсальной СС, а о суммарной группировке КА систем различного назначения.

5. Наибольшая сложность обеспечения пригодности СС МКА по основному численному показателю качества сопряжена с необходимостью преодоления достигнутого предела по процентному соотношению массы полезной нагрузки и полной массы КА. Таким образом, переход от тяжелых или даже среднетяжелых КА к МКА практически никогда не ограничивается простым масштабированием и требует решения совокупности инновационных задач, связанных с конструированием отдельных аппаратов и совершенствованием БНО функционирования их систем в части адаптации под новое конструкторское исполнение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Асташенков А. Спутника погром. *Русская планета*. URL: <http://rusplt.ru/world/roi-sputnikov.html> (дата обращения 20.05.2013).
- [2] Малые спутники ГКНЦ им. М.В. Хруничева. *Теле-Спутник*, 2004, № 12(110).
- [3] Ефремов Г.А., Витер В.В., Липатов А.А. Малые спутники в сетях связи и вещания. *Технологии и средства связи*, 2000, № 1, с. 3–6.
- [4] Гершензон В., Карпенко С. *Малые спутники — провокация или перспективное направление?* URL: <http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12> (дата обращения 12.01.2012).
- [5] Псахье С. Российские ученые намерены создать группировки «умных» мини-спутников. РИА «Новости» URL: <http://ria.ru> (дата обращения 19.09.2014).
- [6] Фаличев О. Неуловимые наблюдатели (малые космические аппараты способны на большее). *ВПК*, 2015, № 28 (594), с. 8.
- [7] Фатеев В.Ф., ред. Малые космические аппараты информационного обеспечения. *Известия вузов. Сер. Приборостроение*, 2009, т. 52, № 4.
- [8] Власов С.А., Мамон П.А. *Теория полета космических аппаратов*. С.-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007.
- [9] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. *Баллистика и навигация космических аппаратов*. 2-е изд., Москва, Дрофа, 2004.
- [10] Лысенко Л.Н., Разумный Ю.Н. Проектная баллистика спутниковых систем: состояние и перспективы. *Сб. докл. конф. «Баллистика вчера, сегодня, завтра»*. С.-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006, с. 98–110.
- [11] Забокрицкий А.В., Пасынков В.В., Пономарёв С.А. Технологии навигационно-баллистического обеспечения полетов космических средств. *Сб. докл. конф. «Баллистика вчера, сегодня, завтра»*. С.-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006, с. 82–97.
- [12] Лысенко Л.Н., Панкратов И.А. *Основы спутниковой навигации*. Москва, Воениздат, 1988.
- [13] Можаяев Г.В. *Синтез орбитальных структур спутниковых систем. Теоретико-групповой подход*. Москва, Машиностроение, 1989.
- [14] Гриценко А.А. Использование стабилизированных вращением малых космических аппаратов в системах спутниковой связи на GEO- и НЕО-орбитах. *IEEE*, 2001, № 21, с. 3–6.

Статья поступила в редакцию 23.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лысенко Л.В. Баллистические проблемы синтеза орбитального сегмента спутниковых систем информационного обеспечения на основе малых и сверхмалых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1428.html>

Лысенко Лев Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФСР, почетный работник высшего профессионального образования России, лауреат премии Президента РФ, действительный член и член Президиума отраслевой Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН) и Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, профессор кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 опубликованных научных работ и изобретений в области баллистики, навигации и управления движением беспилотных летательных и космических аппаратов. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

Ballistic problems in the synthesis of orbital segment of satellite information system based on small and micro spacecraft

© L.N. Lysenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents an analytical review of the major ballistic problems in the synthesis of orbital segment of satellite information provision system based on small spacecraft. Much attention is paid to developing the concept of evaluating the possibility of universalization of small spacecraft satellite system for various purposes. On the basis of considering the problem statement of the synthesis of a ballistic satellite system structure as a Pareto-optimal system, it is shown that the small spacecraft system integration is possible primarily within one class of satellite systems or only "related" satellite system classes. Taking into consideration the trends in the development of classic heavy samples of space technology in civilian and dual-purpose systems, the requirements to technology precision of ballistic-navigation support for satellite system of spacecraft (including small spacecraft) for various purposes are formulated. The problems of using inter-satellite navigation and ballistic aspects of the implementation of the inter-satellite measurement technologies are discussed. The transition from heavy spacecraft systems to small spacecraft satellite system requires solving totality of innovative problems associated with both the construction of the individual satellites, and with adaptive restructuring ballistic-navigation support and its systems.

Keywords: *satellite system, information provision, small spacecraft, orbital segment synthesis, satellite system structure, system-ballistic characteristics, ballistic-navigation support, inter-satellite navigation measurements, local group (cluster), innovative technologies.*

REFERENCES

- [1] Astashenkov A. Sputnika pogrom [Satellite Defeat]. *Russkaya planeta – The Russian Planet*. Available at: <http://rusplt.ru/world/roi-sputnikov.html> (accessed 20.05.2013).
- [2] Malye sputniki GKNTs im. M.V. Khrunicheva [Small Satellites of Khrunichev State Research and Production Space Center]. *Tele-Sputnik*, 2004, no. 12(110).
- [3] Efremov G.A., Viter V.V., Lipatov A.A. Malye sputniki v setyakh svyazi i vesshchaniya [Small Satellites in Communication and Broadcasting Networks]. *Tekhnologii i sredsya svyazi — Technologies and Means of Communication*, 2000, no. 1, pp. 3–6.
- [4] Gershenson V., Karpenko S. *Malye sputniki — provokatsiya ili perspektivnoe napravlenie?* [Small Satellites — a Provocation or an Upcoming Trend?]. Available at: <http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12> (accessed 12.01.2012).
- [5] Psakhye S. Rossiyskie uchenye namereny sozdat gruppirovki "umnykh" minisputnikov [Russian Scientists Intend to Create a Group of "Smart" Small Satellites]. *Rianovosti – RIA News*. Available at: <http://ria.ru> (accessed 12.01.2012).
- [6] Falichev O. Neulovimye nabludateli (malye kosmicheskie apparaty sposobny na bolshee) [Elusive Observers (Small Spacecraft Are not Doing Themselves

- Justice)]. *Voenno-promyshlennyy kuryer –Military-Industrial Messenger*, 2015, no. 28 (594), p. 8.
- [7] Fateev V.F., ed. *Malye kosmicheskie apparaty [Small Spacecrafts]. Izvestiya vuzov. Seriya Priborostroenie — Proceedings of Universities. Instrument Engineering*, 2009, vol. 52, no. 4.
- [8] Vlasov S.A., Mamon P.A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov [The Theory of the Spacecraft Flight]*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2007.
- [9] Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov [Spacecraft Ballistics and Navigation]*. 2nd ed. Moscow, Drofa Publ., 2004.
- [10] Lysenko L.N., Razumnyy Yu.N. *Proektnaya ballistika sputnikovyykh sistem: sostoyanie i perspektivy [Design Ballistics of Satellite Systems: State of the Art and Prospects]. Conference “Ballistics Yesterday, Today and Tomorrow”. Collection of reports*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2006, pp. 98–110.
- [11] Zabokritskiy A.V., Pasyukov V.V., Ponomarev S.A. *Tekhnologii navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniya poletov kosmicheskikh sredstv [Technologies of Navigation-Ballistic Support of Spacecraft Flights]. Conference “Ballistics Yesterday, Today and Tomorrow”. Collection of reports*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2006, pp. 82–97.
- [12] Lysenko L.N., Pankratov I.A. *Osnovy sputnikovoy navigatsii [Fundamentals of Satellite Navigation]*. Moscow, Voenizdat Publ., 1988.
- [13] Mozhayev G.V. *Sintez orbitalnykh struktur sputnikovyykh sistem. Teoretiko-gruppovoy podkhod [Synthesis of the Orbital Satellite System Structures. The group-theoretic approach]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [14] Gritsenko A.A. *Ispolzovanie stabilizirovannykh vrashcheniem malyykh kosmicheskikh apparatov v sistemakh sputnikovoy svyazi na GEO i HEO orbitakh [Using Stabilized Rotation of Small Satellites in the Satellite Communication Systems for GEO and HEO Orbits]. IEEE*, 2001, no. 21, pp. 3–6.

Lysenko L.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Science Worker of the RF, Honored Inventor of the RF, Honorary Worker of Higher Professional Education of Russia, Winner of the Prize of the RF President, Member and Presidium Member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences and Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Professor of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft at Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research publications and inventions in the field of ballistics, navigation and control of motion of unmanned aerial vehicles and spacecraft. e-mail: kafsm3@bmstu.ru