электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 12, декабрь 2015

УДК 629.787+ 623.465.34

Разработка системы принятия решений мобильного исследовательского космического аппарата

Клёнов И.Л., *инженер-программист III категории*
АО «ВПК «НПО Машиностроения»,
Россия, 143966, Московская обл., г. Реутов,

Научный руководитель: ***Красников Н.Н.,*** *начальник отд. НИУ 12-02*
АО «ВПК «НПО Машиностроения»,
Россия, 143966, Московская обл., г. Реутов
vpk@npomash.ru

Исследование и освоение ближайших к Земле планет Солнечной системы является одной из первоочередных задач современной космонавтики. Для решения этой задачи наиболее перспективны автономно управляющиеся КА, высаживаемые на поверхность планеты и предназначенные для самостоятельного передвижения при помощи колёсного или гусеничного движителя, то есть планетоходы. Использование планетоходов позволяет проводить детальные физико-механические и физико-химические, спектрографические, микроскопические исследования грунта и рельефа планеты, что недоступно для орбитальных КА.

Несмотря на дорогостоящие меры по повышению надёжности КА, всегда существует вероятность возникновения непрогнозируемой ситуации, сбоя аппаратуры или ошибки оператора. Если космический аппарат выйдет из строя раньше, чем сумеет выполнить свою основнуюзадачу, топотерянным окажется не толькоценное бортовое оборудование, но и дорогостоящийноситель. Будет потрачено время, выделенное на выполнение научных программ, серьёзно пострадает репутация организации-изготовителя.

По этой причине в качестве альтернативы традиционной схеме высадки одиночного планетохода мини-класса, в работе предлагается вариант с доставкой на поверхность планеты группы из **нескольких аппаратов микро- или нано-класса**. При той же суммарной массе, несколько простых планетоходов, координирующих действия в составе группы, способны показать большую живучесть, чем одиночный аппарат.

Несмотря на меньшую надёжность одного аппарата, такаягруппа небольших КА(см. рис. 1) продолжит выполнять задачу при отказе или потере мобильности однимиз них [1].

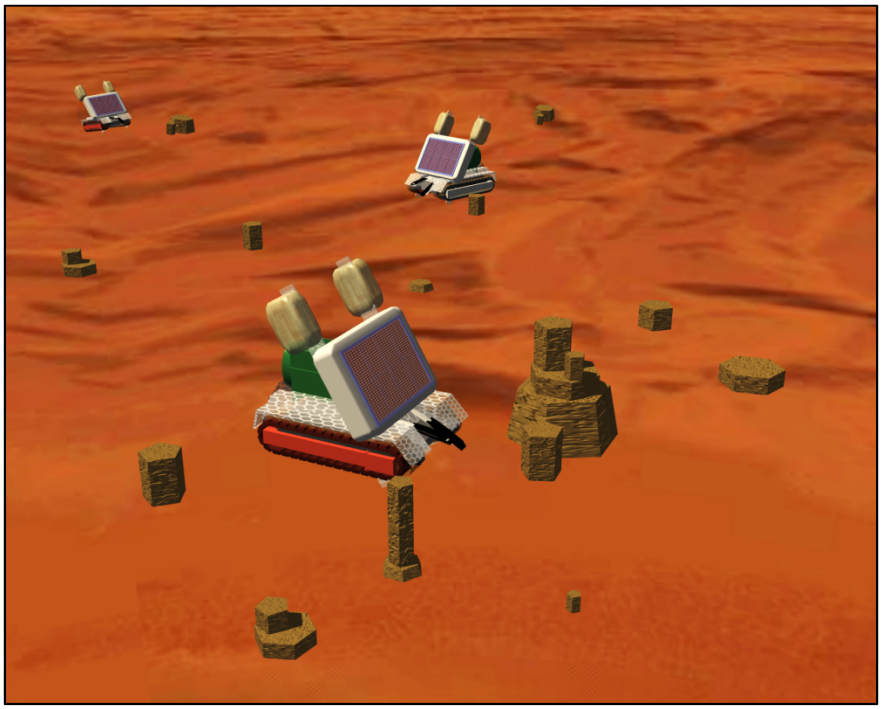

Рис. 1. Имитационная модель, демонстрирующая исследование поверхности Марса группой предлагаемых микро-КА

Принципиальной проблемой управления планетоходом являются задержки при прохождении сигнала, обусловленные большим расстоянием между аппаратом и ЦУП. Поскольку скорость прохождения сигнала ограничена скоростью света, аппарат на поверхности Марса примет сигнал с Земли в среднем через 10-15 минут после его отправки. Это не является препятствием для двустороннего обмена данными, но делает невозможным телеметрическое управление аппаратом в реальном времени.

По этой причине значительную часть времени планетоход действует **полностью самостоятельно**, получая от центра управления полётами общую программу, план действий. Реализация плана аппаратом предусматривает самостоятельное принятие решений [2]. Это, в свою очередь, требует полного и точного анализа окружающей среды на предмет факторов, мешающих выполнению миссии, а также наличия эффективного интеллектуального алгоритма анализа собранных сведений с последующим выбором наилучшего решения.

В настоящий момент производимая российскими предприятиями космической отрасли аппаратура, предназначенная для установки на микро-КА, представлена

преимущественно устройствами, значительно уступающими по вычислительной мощности и качеству датчиков аналогам для более тяжёлых КА.

Исходя из этого, сформулирована **цель работы** – создание адекватно реагирующей на внешние случайные события системы принятия решений (СПР), использующей для управления малогабаритные и сравнительно дешёвые компьютеры (с неизбежно низкой производительностью) и датчики гражданского класса (низкой избирательности).

Сами по себе задачи анализа окружения и принятия решений плохо формализуемы, и потому традиционные алгоритмы требуют от компьютерных систем использования больших вычислительных ресурсов и сложных высокочувствительных датчиков[3]. В то же время эти задачи легко решается простейшими из животных, имеющими сравнительно примитивное строение сенсоров и нервной системы.

Стоит отметить, что решаемые системой задачи типичны для большинства автоматизированных робототехнических комплексов, принимающих решения без участия оператора. Рассмотрим три основных подхода к их решению:

1) классическим является подход, предполагающий оснащение аппарата множествомчувствительных датчиков, обеспечивающих систему управленияполными (зачастую – избыточно)данными о картине мира. В такой системе не возникает неполноты информации – все исходные данные принимаются достоверно известными, и задачавыработки управлениясводится к детерминированной (см. рис. 2, слева). Стоимость датчиков и размер аппарата при этом обычно являются значительными.

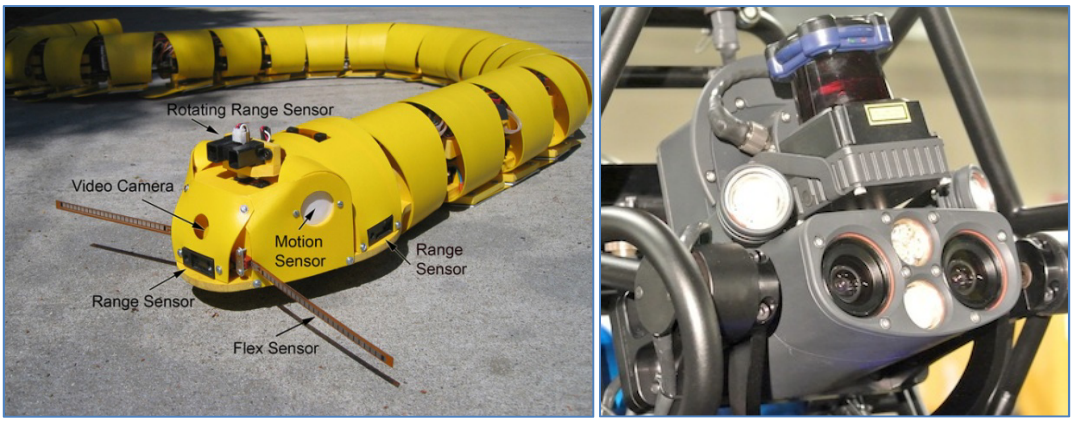

Рис. 2. Сенсоры роботов:
комплекс фронтальных датчиков мобильного исследовательского робота S7, собирающий информацию с избыточностью (слева); датчик робота DARPAAtlas(справа)

2) Альтернативой является установка одного датчика, дающего максимум информации об окружении (традиционноэтовидеокамера или лидар), в комплекте с небольшим количеством вспомогательныхсредств (рис. 2, б). Трудность заключается в анализе потока данных и выделении интересующей информации. Обычно для этого используются алгоритмы технического зрения, весьма сложные вычислительно и требующие для работы мощного аппаратного обеспечения.
3) Получение недостаточной или неточной информации от комплекта датчиков (сигнал со значительными шумами, нечувствительностьи т.п.). Вариант является наименее требовательным к аппаратной части, однако, возникающая **неполнота информации** при этом должна быть компенсирована интеллектуальным алгоритмом управления. Именно этот вариант, по причине особенностей элементной базы, был выбран для рассмотрения.

Примером удачной реализации подобных систем в живой природе является обыкновенный рыжий лесной муравей. Нервная система муравья (см. рис. 3), по сравнению с доступными на сегодняшний день компьютерными средствами, имеет скромные мощности – порядка 20 000 нейронов [4]. При этом муравей, в дополнение к стоящим перед разрабатываемой СПР задачам, успешно совершает множество действий – оннаходит и добывает пищу, строит искусственные сооружения со сложной архитектурой, обменивается информацией с другими муравьями с использованием простого языка.

Рис. 3. Основные характеристики рыжего лесного муравья как автономной единицы с СПР

К сожалению, в настоящий момент невозможно достоверно установить, какими алгоритмами пользуется рыжий лесной муравей. Однако, существование этого вида на

протяжении тысяч лет доказывает, что использование простых аппаратных средств не является принципиальной проблемой на пути к реализации систем подобного класса.

Разработка СПР для выбранного класса КА была разделена на следующие этапы:

1. Построение имитационной модели планетохода микро-класса «в железе».
2. Разработка ПО, фиксирующего внешние события на основании информации от датчиков.
3. Создание системы анализа окружающей среды, включающую инерциальную навигационную систему (ИНС) для определения собственного положения.
4. Разработка алгоритма принятия решений.
5. Создание ПО, вырабатывающего сигнал управления на базе решений, принимаемых разработанным алгоритмом.

В качестве образца-прототипа для создания имитационной натурной модели был выбран КА “Луноход-2”. От более поздних аппаратов его отличает простота принципиальной схемы и элементной базы, позволяющая наглядно понять основные принципы создания подобных аппаратов, а также высокая надёжность конструкции.

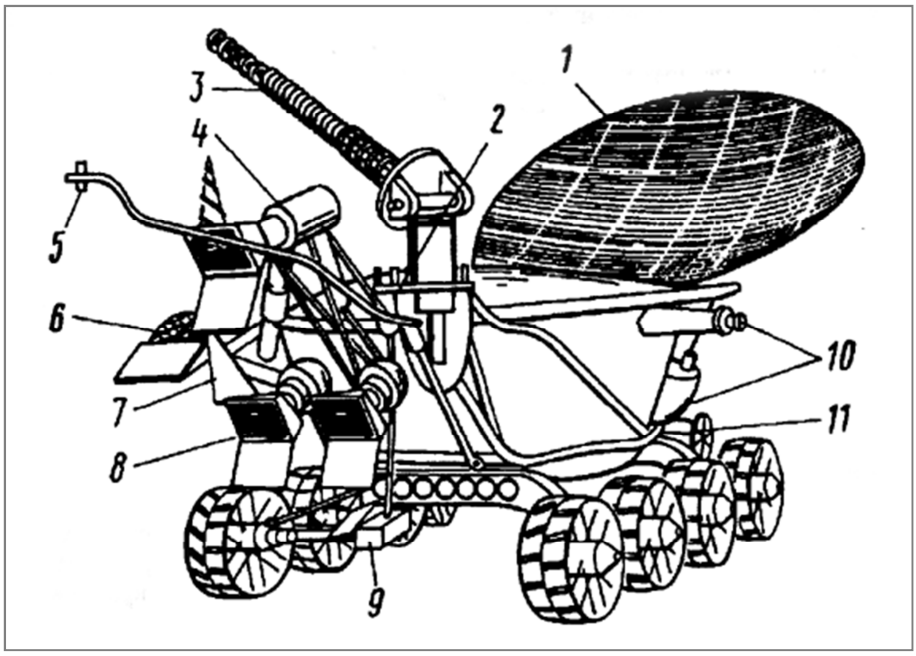

Рис. 4. Принципиальная схема КА «Луноход-2»:
1 – солнечная батарея, 2 – фотоприёмник, 3 – остронаправленная антенна, 4 – верхняя телевизионная камера, 5 – магнитометр, 6 – уголковый отражатель, 7 – астрофотометр, 8 – нижняя телевизионная камера, 9 – выносной блок аппаратуры, 10 – телефотометры, 11 –прибор оценки проходимости [5]

В качестве БЦВМ проектируемой модели была выбрана плата MultiWiiSE 2.5 (рис. 5), основанная на 8-разрядном контроллере Atmega328 с частотой в 16 МГц, оснащённом32 КБ ROMи 2КБ RAM. На плате присутствуют датчики угловой и линейных скоростей – трёхосевойMEMS-гироскоп L3G4200D и трёхосевой MEMS-акселерометр ADXL330.Также плата оснащена барометром и магнитометром.

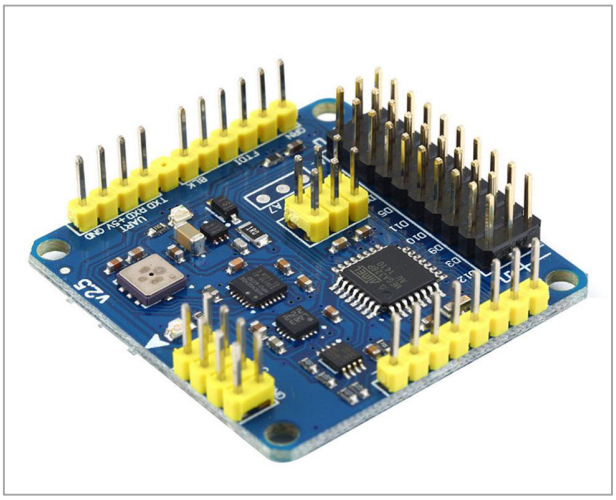

Рис. 5. Плата MultiWiiSE 2.5

Была построена натурная имитационная модель планетохода (рис. 6), отражающая основные закономерности устройства микро-КА подобного типа. Созданная модель продемонстрировала большинство негативных особенностей реального аппарата. Поскольку проектирование СПР не могло быть произведено без учёта этих особенностей, их изучению было посвящено особое внимание.

Установлено, что существенной особенностью планетоходов микро-класса является **высокий уровень вибрации** при движении. В первую очередь, этообусловлено невозможностью установки сложной амортизирующей подвески, подобнойиспользуемой на крупных планетоходах. Немаловажным фактором является и то, что размеры характерных неровностей рельефа сопоставимы с величиной свободного хода подвески миниатюрного аппарата. В то время, как подвеска шасси крупного КА незаметно сглаживает их, для небольшогоаппарата их преодоление чётко фиксируется датчиком линейных ускорений (см. рис. 7).

Вибрации усиливаются вследствие нежёсткости корпуса, вызванной малой толщиной несущих конструкций аппарата, и невозможности неупругого закрепления масс внутри. Чувствительные элементы также особо подвержены воздействию вибраций от работы трансмиссии аппарата, вынужденно близко расположенной к ним в компактном корпусе.

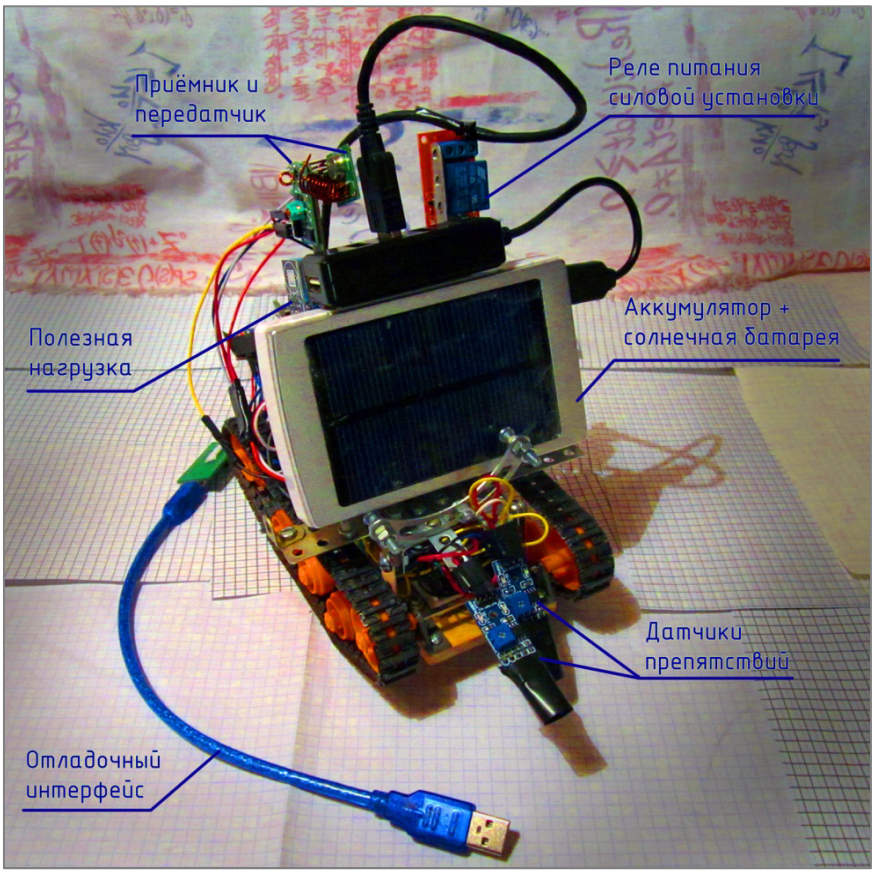

Рис. 6. Внешний вид и особенности компоновки модели КА

Эксперименты на натурной моделипродемонстрировали высокую долю вклада вибрации в сигнал акселерометров. На рис. 7 приведены показания акселерометра, полученные в процессе прямолинейного движения аппарата по поверхности без значительных неровностей. Следует обратить внимание, что сигнал снят для **продольной оси** аппарата (осьX), наименее подверженной действию паразитных вибраций.

Столь низкое соотношение “сигнал-шум” не позволяет использовать сигнал с датчиков линейного ускорения даже после серьёзной обработки.Из этого можно сделать вывод, что традиционная схема инерциальной навигационной системы, позволяющей аппарату оценивать своё положение в пространстве, оказывается неприемлемой для аппаратов такого типа.

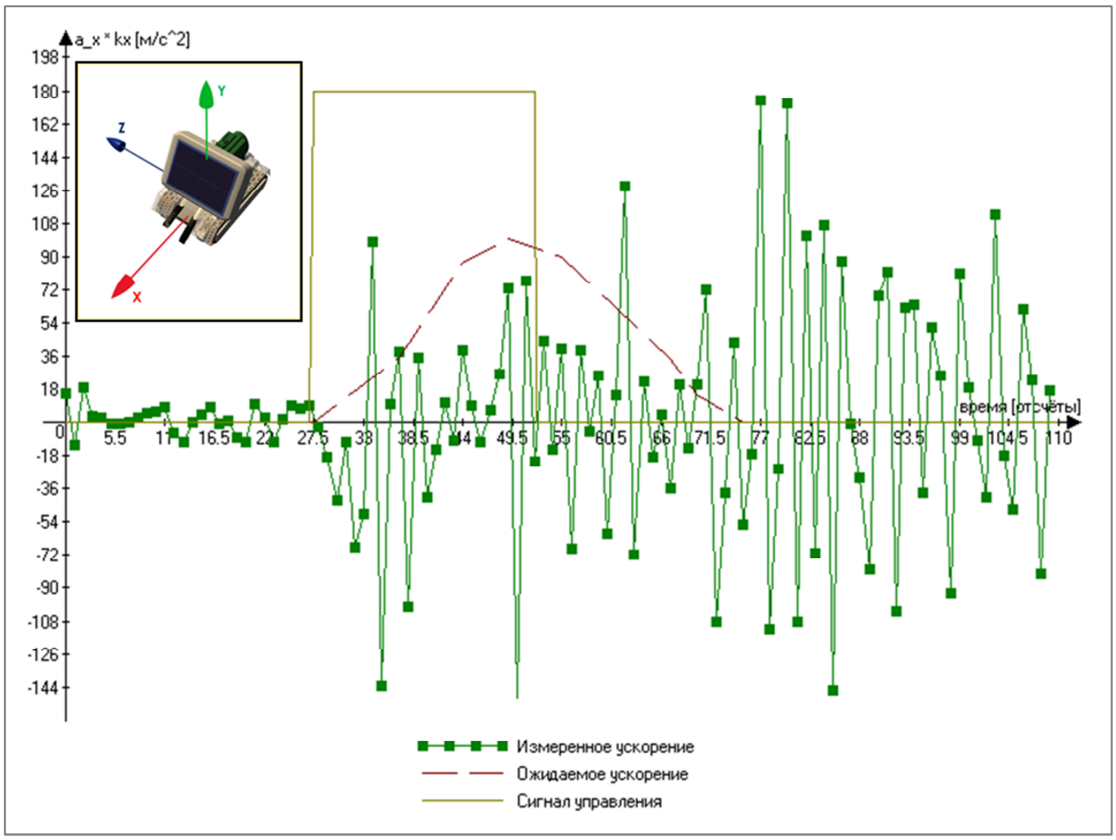

Рис. 7. Показания акселерометра при прямолинейном движении КА (ось X)

Чувствительные элементы аппарата не способны предоставить иных прямых способов определения **направления и скоростиперемещенияаппарата**. Системе управления приходится действовать в условиях неполноты информации. Для того, чтобы восполнить недостающую информацию по имеющимся показаниям датчиков, был разработан интеллектуальный алгоритмкомплексирования и анализа данных с последующим принятием управленческого решения.

Основной для построения модели алгоритма является базисное положение теории управления летательными и космическими аппаратами – разделение движения аппарата на движение центра масс и вращение аппарата вокруг него [6]. В случае орбитальных космических аппаратов движения в большинстве задач можно признать взаимно независимыми. В то же время, для планетохода можно выделить особые случаи.

Рассмотрим простейший алгоритм перемещения аппарата на гусеничном шасси. В предлагаемом варианте движение состоит из последовательных участков прямолинейного перемещения и бортовых (совершаемых на месте, см. рис. 8) поворотов. При движении обе гусеницы шасси планетохода двигаются в одну сторону, при повороте – в разные.

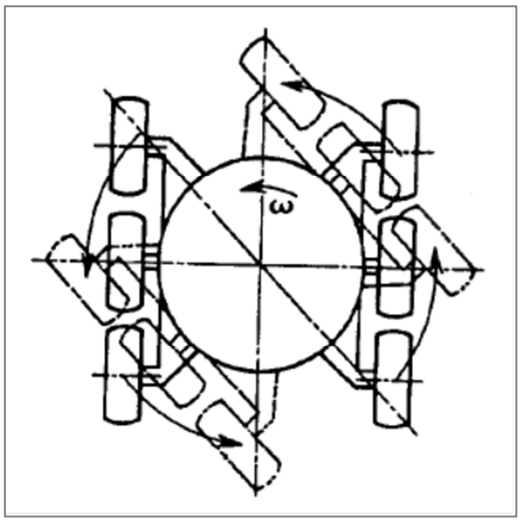

Рис. 8. Бортовой поворот планетохода [5]

Двигаясь с небольшой фиксированной скоростью, аппарат перемещается исключительно вдоль продольной оси связанной системы координат. Развороты изменяют только угловое положение осей связанной системы координат относительно осей базовой.

Такое разделение позволяет, в первом приближении, интегрируя по времени вектор скорости движения планетохода (считая его модуль известным), получать оценку положения аппарата относительно стартовой точки в каждый данный момент. Однако, встреча с незафиксированными препятствиями, пробуксовывание, оседание грунта, неоднородность поверхности под левой и правой гусеницей способныизменить модуль скорости движения. Поскольку показания акселерометров не задействуются, то оценка **измененияскорости** отсутствует. Каким же образом получить оценку модуля скорости в каждый момент работы алгоритма?

Согласно первому закону Ньютона, аппарат будет двигаться равномерно прямолинейно до тех пор, пока приводящие его в движение силы будут равны противодействующим им. Пренебрегая участками практически мгновенного ускорения и торможения, можно отметить, что разгоняющие силы равны замедляющим. Две точки, взятые симметрично на бортах аппарата, будут двигаться с одинаковой как по модулю, так и по направлению скоростью (см. рис. 9. а).

Если аппарат упирается в препятствие (изменяющее скорость движения):

1) со стороны препятствия на планетоход начинает действовать новая сила, направление которой не совпадает с продольной осью;

2) если привести силы (на рисунке опущены), действующие на систему, к равнодействующей и вращающему моменту – возникший момент неизбежно поворачивает аппарат вокруг вертикальной оси (см. рис. 9. б).

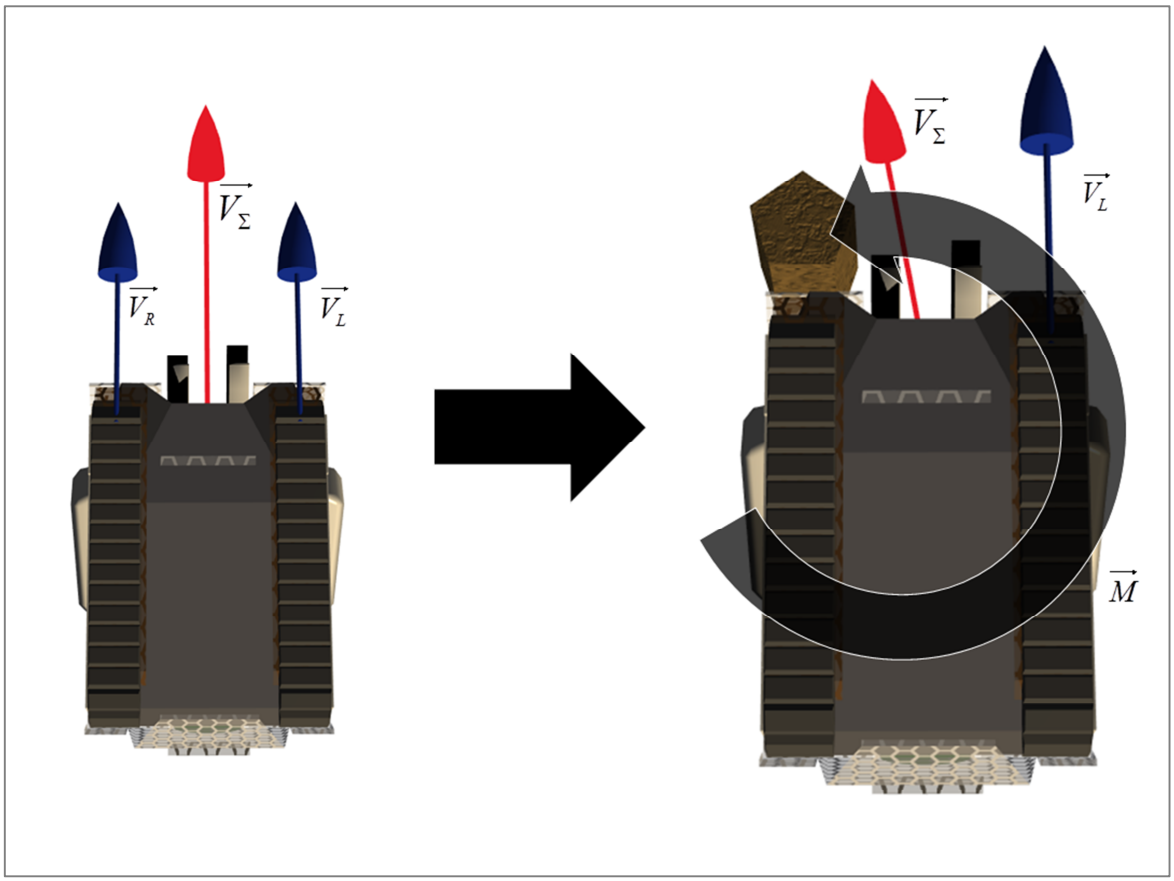

Рис. 9. Возникновение момента при встрече с препятствием: а (слева) – до встречи с препятствием; б (справа) – в момент встречи

Таким образом, изменение скорости движения центра масс возможно отследить, контролируя незапланированные отклонения угла курса аппарата от программных значений. Для этого применимы гироскопы, показания которых слабо подвержены действию вибраций.

Система управления строит собственную карту местности, отмечая свои координаты в базовой СК. С использованием полученных от ИНС данных оценивается характер движения аппарата (см. рис. 10). По величине и характеру возмущений определяется, перемещается ли в настоящий момент аппарат, или застрял. В случае возникновения ситуаций, когда движение заблокировано, или угол крена или тангажа достигает критических значений, система управления принимает решение на возврат в предыдущее положение, если это возможно.

В случае, если достижение цели движения по прямой невозможно, аппарат сворачивает, огибая препятствие. Для этого используется либо “правило лабиринта” (следование вдоль маршрута так, что препятствие всегда остаётся справа), либо применение попеременного выбора сторон. Если поиск вернул аппарат к исходной точке или снова отправил по знакомой местности, то применяется алгоритм поиска пути A*.

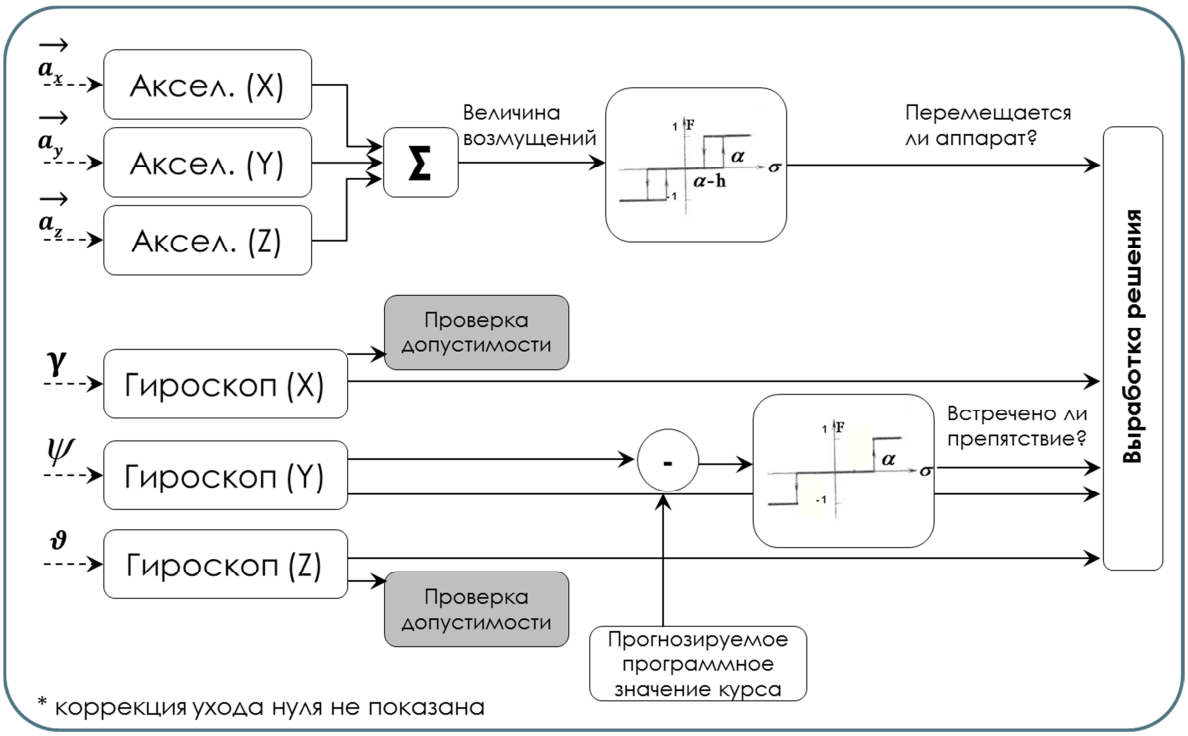

Рис. 10. Логика принятия решений управления

На основании разработанного алгоритма реализовано бортовое ПО натурной имитационной модели, продемонстрировавшее работоспособность указанного алгоритма.

При помощи созданной натурной имитационной модели исследованы проблемы проектирования КА-планетоходов микро- и нано-классов, синтезирован алгоритм оценки окружающей среды и принятия решений.

Дальнейшим направлением развития темы будет являться создание алгоритма управления группировкой аппаратов, их информационного обмена и взаимодействия.

Список литературы

1) Клёнов И.Л. Разработка центральной вычислительной системы барражирующей крылатой ракеты // Молодёжный научно-технический вестник. 2014. № 12. Режим доступа: http://sntbul.bmstu.ru/doc/747422.html (дата обращения 04.12.2015).
2) Мур Дж., Скофилд У., Тоубн У. Автоматическое управление движением планетохода, спускаемого на поверхность Марса // VII Международный Симпозиум ИФАК по автоматическому управлению в пространстве. Т. IV. М.: Наука, 1978. С. 140-148.
3) Избачков Ю.А., Петров В.Н. Информационные системы: учебник для вузов. М.: «Питер», 2005. 655 с.
4) Купянская А Н. Муравьи (Hymenoptera, Formicidae) Дальнего Востока. Владивосток, 1990. 258 с.

5) Кемурджиан А.Л. Планетоходы. М.: Машиностроение, 1993. 2-е изд. 400 с.
6) Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1973. 616 с.