

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ РЕЗЕРВНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**В.И. Майорова, Д.А. Гришко, Б.А. Ремень,
А.А. Амбарцумов, И.С. Калдаров**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
e-mail: victoria.mayorova@gmail.com, dim.gr@mail.ru

Рассмотрены вопросы повышения оперативности обработки телеметрической информации, поступающей с космического аппарата по резервному каналу связи. Приведены результаты анализа телеметрии некоторых малоразмерных космических аппаратов.

Ключевые слова: телеметрическая информация, малоразмерный космический аппарат, SSB-модуляция, резервный канал связи.

AUTOMATION OF RECEIVING AND PROCESSING OF AUXILIARY TELEMETRY DATA FROM SPACECRAFTS

**V.I. Mayorova, D.A. Grishko, B.A. Remen,
A.A. Ambartsumov, I.S. Kaldarov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: victoria.mayorova@gmail.com, dim.gr@mail.ru

Issues of improving the efficiency of processing of the telemetry data supplied from spacecrafts via the auxiliary communication channel are considered. Results of telemetry analysis for certain small spacecrafts are given.

Keywords: telemetry data, small spacecraft, SSB modulation, auxiliary communication channel.

Особенности телеметрической системы малых космических аппаратов. В последнее десятилетие существенно возросло число функционирующих на околоземных орбитах малоразмерных космических аппаратов (МКА), что обусловлено относительно низкой стоимостью их изготовления и быстрым развитием электроники. Даже так называемые кубсаты (cubesat), представляющие собой по форме куб с ребром 10 см, способны успешно конкурировать с более габаритными космическими аппаратами, решая точечные научные задачи и обеспечивая получение навыков работы с МКА в университетской среде. Центр управления полетами МКА МГТУ им. Н.Э. Баумана (ЦУП-Б) осуществляет слежение, прием и обработку телеметрической информации (ТМИ) с нескольких МКА, передающих данные в радиолюбительском диапазоне частот 435...437 МГц. Прием и обработка ТМИ с этих МКА рассматривались изначально в качестве тренировок для получения необходимого опыта управления собственными МКА “Бауманец” и “Бауманец-2”. Вместе с тем за время работы с данными космическими аппаратами было выявлено несколько ключевых моментов, с которыми ЦУП-Б неизбежно столкнется после

запуска собственного спутника, самым важным из которых является низкая скорость обработки ТМИ при определенных режимах передачи информации с борта на Землю. Следовательно, основной задачей представляется повышение скорости обработки ТМИ и высвобождение времени под оперативный анализ полученных данных [1].

Особенностью многих зарубежных МКА является передача данных по каналу борт–Земля вне зоны основного приема в однополосной (SSB) модуляции, при которой сигнал передается в виде кода Морзе (CW-сигнал). В случае отечественных МКА этот тип передачи часто используется в качестве резервного канала связи, который хотя и уступает по информативности основному частотно-модулированному (FM) сигналу, однако при этом имеет важные преимущества, главным из которых является выигрыш в мощности полезного излучаемого сигнала. При SSB-модуляции несущая частота и одна из боковых полос сигнала не излучаются [2], что позволяет всю располагаемую мощность излучать в виде одной боковой полосы. Мощность сигнала, используемая для передачи полезной информации при амплитудной и частотной модуляциях, составляет, в лучшем случае, 1,25 Вт, а при использовании SSB-модуляции — все 10 Вт. Таким образом, при приеме SSB-модулированного сигнала передатчика с пиковой мощностью 10 Вт слышимость будет такой же, как при приеме амплитудно-модулированного сигнала с передатчика, мощность которого 80 Вт, что дает выигрыш по мощности в 8 раз. Однако преимущества SSB-модуляции не ограничиваются только этим [2]. Мощность несущей частоты станции с амплитудной и частотной модуляцией поддерживается постоянно, независимо от того, посылается полезный сигнал или нет. Станции с SSB-модуляцией не тратят никакой энергии в паузах между сигналами. Кроме экономии энергии и облегчения режима работы выходного каскада передатчика это дает дополнительные преимущества при работе в перегруженном станциями канале. При использовании амплитудной или частотной модуляций включение более мощной станции полностью подавляет более слабую, делая прием сигнала с нее невозможным; при использовании SSB-модуляции в паузах между сигналами мощной станции работу слабой станции можно услышать, при этом удастся не только следить за МКА, но и уловить смысл сообщения [3]. Если уровень мощности сигналов со станций, создающих помехи, не сильно превышает уровень мощности принимаемого сигнала и частоты всех станций точно совпадают, все равно возможно воспринимать большую часть информации с нужной станции, подобно тому как люди понимают друг друга при разговоре в окружении говорящих людей. Все перечисленные преимущества SSB-модуляции позволяют при прочих равных условиях

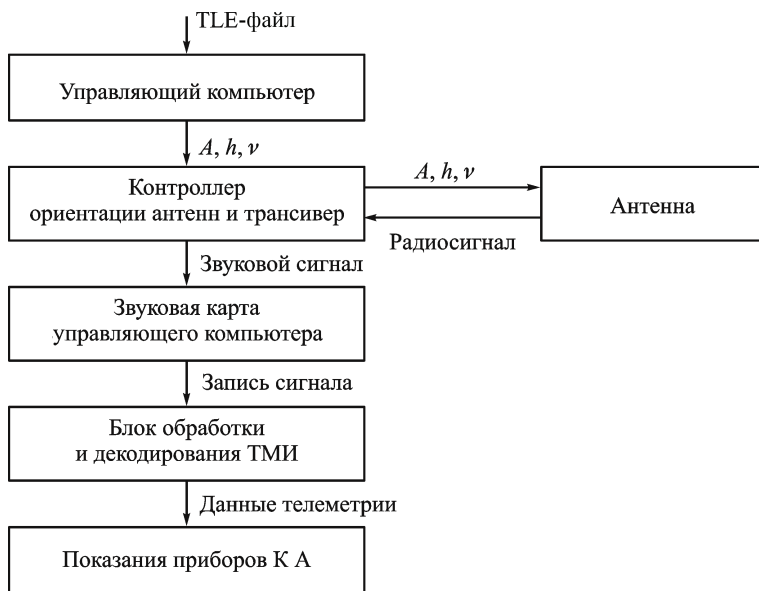


Рис. 1. Принципиальная структурная схема приема и обработки ТМИ в ЦУП-Б МГТУ им. Н.Э. Баумана

получить дальность связи на 50...75% больше, чем при амплитудной или частотной модуляции. Поэтому SSB модуляция наилучшим образом подходит для резервных каналов связи, ее применение полностью оправдано в случае возникновения нештатных ситуаций с системами энергоснабжения КА или для маломощных студенческих аппаратов, таких как кубсаты.

Прием телеметрии с МКА и простейшие пути оптимизации процесса. Рассмотрим принципиальную структурную схему приема и обработки телеметрической информации с МКА в ЦУП-Б МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 1). Используя содержащуюся в TLE-файлах информацию, управляющий компьютер рассчитывает текущие координаты КА, передавая на контроллер ориентации антенн необходимые целеуказания (значения азимута и угла места), а на трансивер — частоту приема с учетом эффекта Доплера. Радиосигнал, полученный со спутника, преобразуется в трансивере в звуковой и поступает на звуковую карту управляющего компьютера, где может быть записан и обработан. В блоке обработки и декодирования ТМИ звуковой СВ-сигнал преобразуется в текстовую последовательность точек и тире, а затем эта последовательность переводится в литеры латинского алфавита, комбинации которых представляют собой зашифрованную ТМИ. И наконец, с использованием дешифратора ТМИ (для каждого аппарата он свой) проводится декодирование и на выходе получают показания приборов КА в данный момент времени.

Прием СВ-сигнала в SSB-модуляции сильно осложняется следующими факторами: восприятием сигнала оператором на слух [4] при

ощутимой зашумленности внешнего радифона в условиях г. Москвы и, как следствие, необходимостью декодирования полученного сигнала в ручном режиме, а также необходимостью точной подстройки частоты для получения наилучшей разборчивости принимаемого сигнала и ручным режимом сопровождения КА. В случае приема и обработки ТМИ в ручном режиме оператор выступает в качестве активного функционального звена. В момент приема ТМИ он одновременно осуществляет слежение за наблюдаемым КА и постоянную коррекцию частоты приема сигнала. После окончания приема оператор должен прослушать записанный сигнал в звуковом формате, на слух воспринять телеграфный код и расшифровать его, что требует от оператора владения навыками телеграфирования и повышенного внимания [5]. На этом шаге обработки возможно появление большого числа ошибок, что скажется в дальнейшем при дешифровании полученных данных.

С учетом вышесказанного полезным оказывается использование программного обеспечения (ПО), позволяющего визуализировать принимаемый сигнал в виде амплитудно-частотного спектра (рис. 2). В ЦУП-Б МГТУ им. Н.Э. Баумана для этой цели используется ПО Spectrogram 16.exe. Такое ПО удачно подходит для визуального контроля качества настройки частоты и принимаемого сигнала, а также для записи приема телеметрии в целях ее последующей обработки [6]. Этим снимается требование к оператору — иметь специальную подготовку для записи сигнала на слух, тем самым исключаются ошибки при записи сигнала. Тем не менее, для декодирования записанного сигнала требуется от 15 до 20 мин, что занимает по времени 1/4–1/6 среднего периода обращения многих МКА; это обстоятельство снижает оперативность управления КА в случае нештатных ситуаций [1].

Автоматизация приема телеметрии с помощью программы MorseSignalDecoder.exe. В целях автоматизации процесса декодиро-

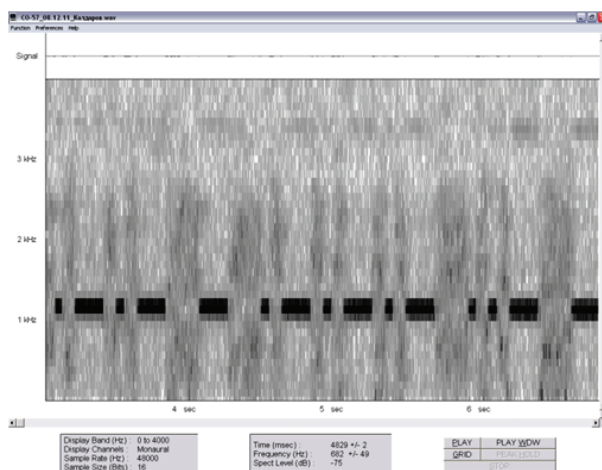


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр CW-сигнала в программе Spectrogram 16

нештатной ситуации и принятия необходимого решения для ее устранения.

Для корректной работы созданного продукта необходимо наличие устойчивого по частоте сигнала с минимальной зашумленностью. В процессе сеанса связи из-за доплеровского смещения частоты происходит заметное сползание графика сигнала (а при недостаточном опыте оператора — даже скачки), которое устраняется автоматическим сопровождением КА антенной системой по обновляемым орбитальным данным (при условии точной синхронизации времени) и автоматической подстройкой частоты, что реализовано в используемом комплексе управления МКА NavWin-Навигатор v.5.2 производства НИЛАКТ (г. Калуга). Внешний фон эффективно нейтрализуется с помощью программы Cool Edit Pro, позволяющей увеличивать амплитуду в случае, если уровень поступившего сигнала достаточно слабый, а также точно определять длительности точки и тире, которые различны для каждого МКА.

В результате длительность обработки рассматриваемого типа ТМИ при использовании предложенных алгоритмов может быть сокращена до 5 мин, при этом существенно снижаются требования к внимательности оператора и его утомляемость. Далее приводится структурная схема приема и обработки ТМИ в полуавтоматическом режиме (рис. 4), где оператор уже выступает в качестве ретранслятора, обеспечивающего переход информации между блоками.

Созданный ПП был использован для декодирования телеметрии с трех МКА, с которыми в настоящее время работает ЦУП-Б МГТУ им. Н.Э. Баумана: RS-30 (Россия), СО-57 и СО-58 (Япония).

Особенности функционирования МКА. Малоразмерный космический аппарат RS-30 (“Юбилейный”). Космический аппарат RS-30 (“Юбилейный”) движется по околокруговой орбите на высоте, близкой к 1500 км, и представляет собой шестигранную призму. На ранних этапах полета проводилась работа с полезной нагрузкой Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева (СибГАУ). Последний сеанс связи с КА “Юбилейный” был проведен накануне 12 апреля 2010 года, после чего спутник стал передавать данные только через резервный канал связи. Существенным индикатором его последующего состояния является полное отсутствие тока в бортовой сети, судя по показаниям датчика, это значение составляет около 0,00018 А вместо положенного диапазона 0,1...3,5 А, соответственно нулевым является питание на основном передающем и принимающем устройстве. Вместе с тем температурный режим уверенно держится в течение всего времени наблюдений

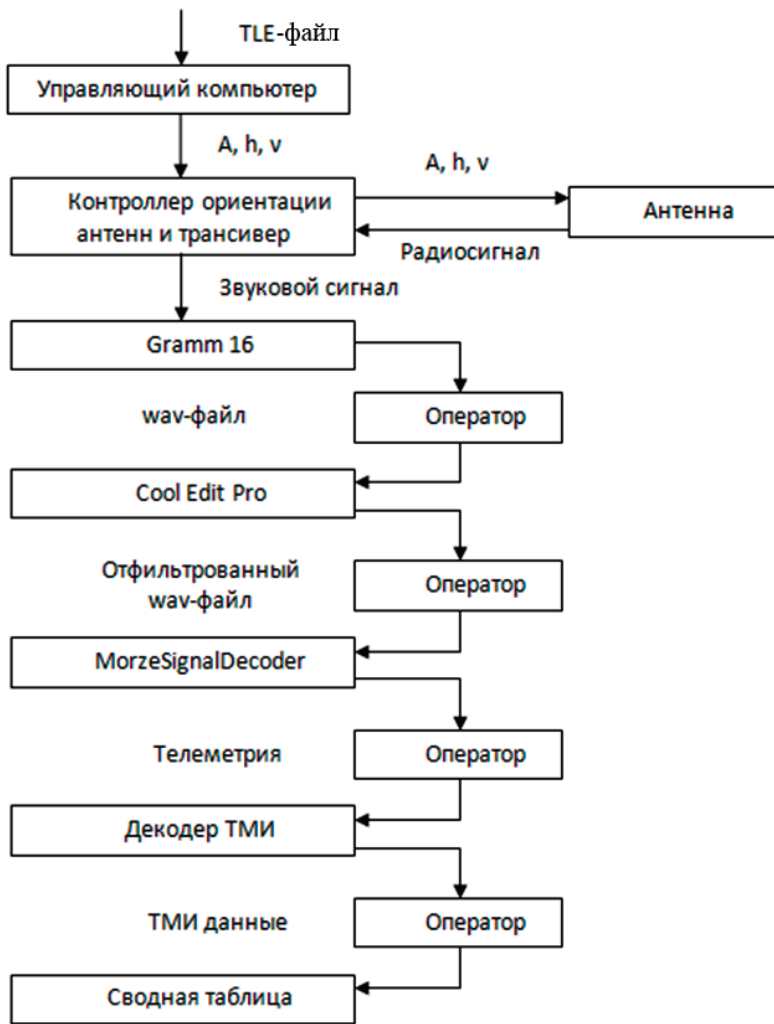


Рис. 4. Структурная схема приема и обработки телеметрии в полуавтоматическом режиме

до настоящего времени на допустимом уровне, незначительные отклонения компенсируются. Наиболее подверженным температурным колебаниям узлом является аккумуляторная батарея (АБ) (рис. 5). Напряжение бортовой сети поддерживается в рамках допустимого диапазона 10...16 В. Напряжение и ток на солнечных батареях наблюдаются на некоторых витках; учитывая, что прием телеметрических данных велся не ежедневно, однозначно говорить о состоянии этого функционального элемента КА не представляется возможным.

Космический аппарат СО-57 (тип Cubesat). Данный КА был создан в университете Токио (Япония) и представляет собой по форме стандартный куб с длиной ребра 10 см, движущийся по солнечно-синхронной орбите на высоте около 820 ± 25 км, вне основной зоны

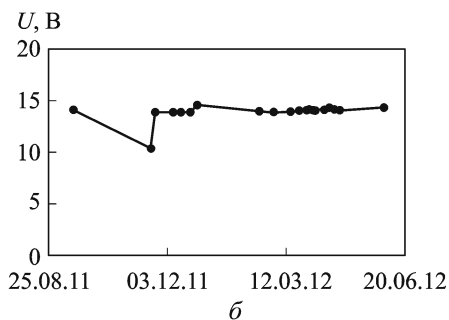
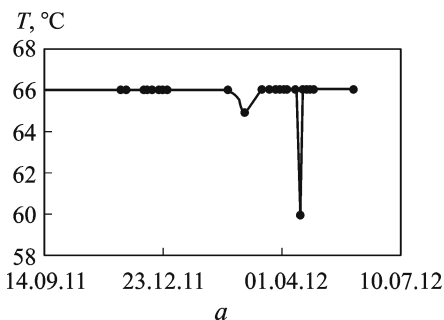


Рис. 5. Показания датчиков температуры АБ (а) и напряжения (б) бортовой сети КА “Юбилейный”

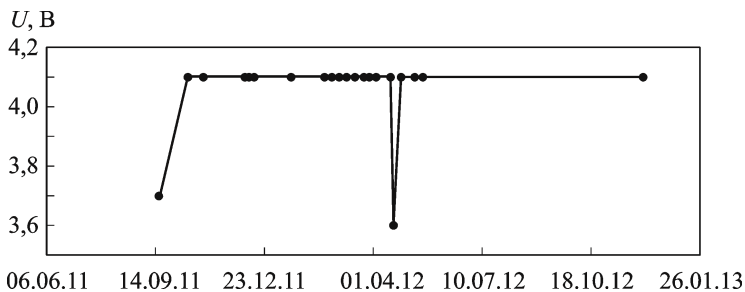


Рис. 6. Показания датчиков напряжения питания МКА СО-57. Резкому снижению напряжения питания соответствуют процессы развертывания антенны и перезагрузки бортового компьютера “watch dog” таймером

приема передает информацию по резервному каналу. Первым характерным параметром можно считать SEL – фиксатор одиночных событий (Single Event Latchup), который принимает целочисленные значения в интервале от 0 до 7. Обычно это значение — 0, если в силу различных причин начинался отсчет, то при достижении значения 7 на следующем шаге счетчик обнуляется. Инициирование отсчета имеет место при повреждении электрических схем КА радиацией с последующим полным выходом их из строя. Электрическая схема перезагружается и предпринимаются попытки ее восстановления. Значение SEL показывает число подобных перезагрузок, которые имели место на борту СО-57, на всем интервале дискретных временных измерений этот параметр был равен нулю. Развертывание антенны и перезагрузка бортового компьютера, как показывают измерения, требуют серьезных затрат энергии батареи (рис. 6), так как ее состояние при совершении этих процессов качественно изменяется с уровня “близка к насыщению” на “быстро разряжающаяся”. Аппарат должен зарядить батарею через солнечные панели до того, как текущее значение станет ниже допустимого, остаточный заряд батареи напрямую связан с параметром “напряжение питания”. Точность определения температуры шести поверхностей, трансмиттера и батареи относительно невелика. Значения, выходящие за допустимый диапазон, плохо влия-

ют на внутреннее оборудование, поэтому важен постоянный мониторинг температурного режима КА. Измерения показывают, что стенки аппарата, батарея и трансмиттер держат температуру около 20°C со средней амплитудой колебаний $\pm 20^{\circ}\text{C}$, что является допустимым для КА рассматриваемого класса. Вместе с тем в отдельные моменты времени стенки охлаждаются до -40°C и даже до -60°C . Также важно знать значение тока питания, обеспечивающего связь между СО-57 и наземной станцией приема, так как связь с СО-57 не может быть осуществлена, если значение этого параметра будет меньше требуемого. Отметим, что в зависимости от степени освещенности грани спутника с солнечной панелью (система стабилизации отсутствует) значение тока на ней может отличаться в 1,5–2 раза.

Космический аппарат СО-58 (тип Cubesat). Данный космический аппарат был создан в университете Токио (Япония) и представляет собой по форме стандартный куб с длиной ребра 10 см, вне основной зоны приема передает информацию по резервному каналу. Космический аппарат СО-58 является обновленной версией своего предшественника СО-57, т.е. различия в служебных системах этих двух КА минимальны. Так же как и в случае с КА СО-57, на нем зафиксировано использование встроенной web-камеры. Перезагрузок бортового компьютера не наблюдалось. Космический аппарат характеризуется несколько меньшим средним значением напряжения, получаемого с солнечных батарей, по сравнению со своим предшественником. Этот факт хорошо соотносится с малыми значениями тока на гранях КА в 2–3 раза меньше по сравнению с КА СО-57. Он также отличается большей устойчивостью к внешним температурным нагрузкам.

Заключение. Даже в случае автоматизации процесса оператор все еще остается важным звеном в цепи приема и обработки ТМИ. Для того чтобы процесс приема и обработки ТМИ происходил автоматически в реальном масштабе времени и возможность возникновения ошибки была минимальной, необходимо свести роль оператора к уровню наблюдателя. Поскольку программа NavWin-Навигатор уже сейчас полностью обеспечивает автоматическое слежение за КА и управление частотой приема, то задача сводится к объединению функций, выполняемых программами Spectrogramm.exe, Cool Edit Pro, MorseSignalDecoder.exe и декодеров ТМИ, в одной программе, а также к созданию базы данных ТМИ по каждому КА. Например, чтобы уйти от использования стороннего ПО Cool Edit Pro и свести роль зашумленности радифона к минимуму, можно воспользоваться быстрым преобразованием Фурье для разложения полученного сигнала на частоты и работать только с той частотой, по которой осуществляется прием телеметрии. Такой подход позволит выйти на качественно

новый уровень работы с МКА, использующими телеграфный код, и даст возможность работать с большим числом КА одновременно в автоматическом режиме.

Созданный ПП является уникальным, так как в свободном доступе никаких подобных средств автоматического декодирования не представлено, а существующие аналоги не подходят для решения конкретных задач, так как не являются универсальными. На данный момент с использованием разработанного ПП время обработки ТМИ и участие оператора сведены к разумному минимуму. В перспективе планируется исследовать возможность объединения фильтрации сигнала и его декодирования в созданном ПП в единый замкнутый контур, что позволит сделать цепь “прием ТМИ–фильтрация шумов–декодирование” полностью автоматической.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.9 Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы”, государственный контракт от 18 августа 2011 года № 11.519.11.5002, шифр 2011-1.9-519-004”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин В. А. Телеуправление и телеизмерение. М.: Энергоиздат, 1982. 560 с.
2. Виды модуляции в радиосвязи [Электронный ресурс] // URL: <http://vector-radio.ru/vidyi-modulyatsii-v-radiosvyazi.html> (Дата обращения 12.03.12).
3. Преимущества однополосной модуляции SSB [Электронный ресурс] // URL: <http://radiovolna.nn.ru/preimuschestva/> (Дата обращения 10.02.12).
4. Учим телеграф дома [Электронный ресурс] // URL: http://gosh-radist.blogspot.com/p/blog-page_25.html (Дата обращения 29.03.12).
5. Азбука Морзе [Электронный ресурс] // ВинРадиоФорум URL: <http://hamradio.mybb.ru/viewtopic.php?id=977> (Дата обращения 10.01.12).
6. Радионаблюдения ИСЗ. Прием телеметрии. [Электронный ресурс] Наблюдения искусственных спутников Земли // URL: <http://www.sat.belastro.net/glava5/glava5.2.p1.php> (Дата обращения 17.01.12).

REFERENCES

1. Il'in V. A. Teleupravlenie i teleizmerenie [Remote control and telemetry]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 560 p.
2. Vidy modulyatsii v radiosvyazi [Modulation formats in radio communication]. Available at: <http://vector-radio.ru/vidyi-modulyatsii-v-radiosvyazi.html> (accessed 12 March 2012).
3. Preimushchestva odnopolosnoi modulyatsii SSB [Advantages of single-sideband modulation (SSB)]. Available at: <http://radiovolna.nn.ru/preimuschestva> (accessed 10 February 2012).
4. Uchim telegraf doma [Learn telegraph at home]. Available at: http://goshradist.blogspot.com/p/blog-page_25.html (accessed 29 March 2012).

5. *Azbuka Morze* [Morse code]. Available at: <http://hamradio.mybb.ru/viewtopic.php?id=977> (accessed 10 January 2012).
6. *Radionablyudeniya* ISZ. Priem teletmetrii. Nablyudeniya iskusstvennykh sputnikov Zemli [Radio observations of satellites. Receiving telemetry data. Monitoring artificial earth satellites]. Available at: <http://www.sat.belastro.net/glava5/glava5.2.p1.php> (accessed 17 January 2012).

Статья поступила в редакцию 18.10.2012

Вера Ивановна Майорова — д-р техн. наук, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области разработки космической техники и образовательных космических технологий.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.I. Mayorova — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of development of space machinery and educational space technologies. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Дмитрий Александрович Гришко — студент кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ по космической технике.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

D.A. Grishko — student of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of space technology. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Борис Андреевич Ремень — студент кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ Н.Э. Баумана.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

B.A. Remen — student of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Артур Арташесович Амбарцумов — студент кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ Н.Э. Баумана.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

A.A. Ambartsumov — student of “Launch Rocket Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Ибрагим Семетеевич Калдаров — студент кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ Н.Э. Баумана.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

I.S. Kaldarov — student of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.