

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.032.2

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАКЕТНЫХ ПУСКОВ

С. В. Спицын, аспирант кафедры САПР ВС РГРТУ, инженер-конструктор 1 категории АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-6468-5043, e-mail: spitsyn62@gmail.com

А. В. Товпеко, главный конструктор проекта АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-9230-4316, e-mail: tovpeko.av@samspace.ru

С. А. Тихомиров, доцент кафедры САПР ВС РГРТУ, главный конструктор проекта АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-3174-1536, e-mail: serge-tikhomirov@yandex.ru

Рассматривается обобщенный алгоритм обработки и представления цифровых траекторных параметров бортовой навигационной аппаратуры потребителя, установленной на борту изделия при проведении ракетных пусков (полигонных испытаний). Целью работы является нахождение обобщенного алгоритма обработки цифровых параметров бортовой навигационной аппаратуры потребителя (БНАП), используемой при проведении полигонных испытаний сложных изделий ракетно-космической техники и содержащего этапы первичной обработки параметров, преобразования цифровых кодов параметров в единицы физических величин, формирования выходных структур БНАП, а также определения первичных и вторичных величин, необходимых в решении траекторной задачи и формирования унифицированного цифрового потока представления траекторных измерений, применяемого для передачи результатов обработки параметров БНАП в среду графического представления.

Ключевые слова: информационно-измерительное обеспечение пусков, системы сбора измерительной информации, бортовая навигационная аппаратура потребителя, ТМИ.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-118-126

Введение

Обработка и анализ цифровой телеметрической информации, поступающей с борта изделия при проведении полигонных испытаний и содержащей кадры бортовой навигационной аппаратуры потребителя (траекторные измерения), является одной из приоритетных задач, так как именно анализ траекторных отклонений изделия вносит значительный вклад в полноценную и информативную оценку результатов пуска. Предлагается реализовать следующее:

- установить общую последовательность действий, выполняемую программным комплексом обработки цифровых параметров БНАП;
- определить этапы формирования выходных структур БНАП, включая этапы извлечения цифровых параметров;
- определить первичные и вторичные величины, необходимые для решения траекторной задачи, а также определить методику их математического расчета;
- определить методику перехода между различными системами координат;

– разработать единый унифицированный формат потока представления траекторных параметров, применяемый для передачи результатов обработки БНАП от программ-обработчиков в программу графического представления траекторной информации.

Теоретическая часть

Этапы первичной обработки и представления цифровых параметров БНАП

Кадр БНАП в отличие от кадра БЦВК рассматривается как фиксированная структура с неизменным составом параметров. В общем случае кадры поступают асинхронно относительно циклов ТМИ, то есть начало кадра не связано с началом цикла, а частота поступления кадров не кратна частоте следования телеметрических блоков. Кадр извлекается по маркеру (признаку начала) и контрольной характеристике. Последовательность действий, выполняемая программным комплексом при обработке цифровой информации, показана на рисунке 1:

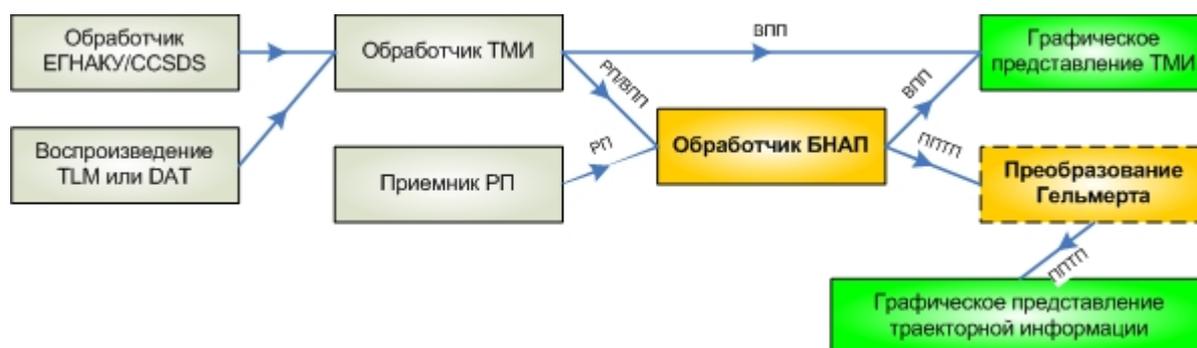


Рисунок 1 – Схема обработки ТМИ, содержащей кадры БНАП

Figure 1 – The TMI containing BNAП frames processing sequence

– по адресам цифровых устройств в ТМС извлекается подпоток параметров и, привязанный ко времени, записывается в массив в том порядке измерительных каналов, в каком они были извлечены из ТМИ (данная функция возлагается на обработчик полных потоков ТМИ, предшествующей программе обработки БНАП в технологической цепи);

– в сокращённом потоке осуществляется поиск маркера кадровой структуры, при выявлении искомой комбинации слов осуществляется проверка контрольных характеристик БНАП. Выделенный кадр протоколируется в файл цифровых структур и направляется на дальнейшую обработку для извлечения параметров движения изделия;

– в кадре осуществляется поиск параметра по адресу в цифровом массиве (для БНАП адреса фиксированные, определяются протоколом сопряжения БНАП с ТМС и методикой обработки) – это адресация, маскирование, формирование измерительного слова;

– преобразование кода цифрового параметра в единицы физических величин умножением на коэффициент цены младшего разряда, в соответствии с формулой:

$$P_{фв} = P_{code} \times K_{цмр};$$

– формирование потоков представления траекторных параметров (ПТП) для направления на графический просмотр в программе визуализации и графического представления траекторных измерений.

На отображение в составе ПТП направляются следующие данные:

1. Решение навигационной задачи (при его наличии – готовности данных) для отображения моделей полёта на картах и таблицах:

– время, на которое даётся решение, может являться московским, всемирным координированным (UTC), а также временем ГЛОНАСС и GPS (требующим априорной поправки для приведения к UTC);

– три геоцентрические координаты – как правило, в системе для общеземного эллипсоида;

– три проекции вектора скорости в той же геоцентрической системе.

2. Информация по навигационным спутникам для формирования диагностической диаграммы:

– номера спутников, характеризующие их принадлежность к глобальным системам NAVSTAR или ГЛОНАСС;

– состояния измерительных каналов – например, отсутствие приёма, синхронизация различной степени (по коду, по фазе), участие в решении навигационной задачи, срыв приёма и экстраполяция;

– уровни сигнал/шум.

3. Условная оценка достоверности информации в процентах.

Так как комплекс визуализации и графического представления телеметрической информации ожидает координаты для наложения на определённый земной эллипсоид (для получения геодезических широты, долготы и высоты для позиционирования точки траектории на карте), рассылке на отображение предшествует преобразование Гельмерта для перехода из одной прямоугольной геоцентрической системы координат в другую.

Экспериментальные исследования

Формирование выходных структур БНАП

Рисунок 2 иллюстрирует порядок обработки цифровой информации – от уровня исходного полного потока ТМИ до выделенного параметра, готового к отображению пользователю. Процесс формирования выходных структур БНАП как в реальном времени, так и после сеанса включает следующие подзадачи:

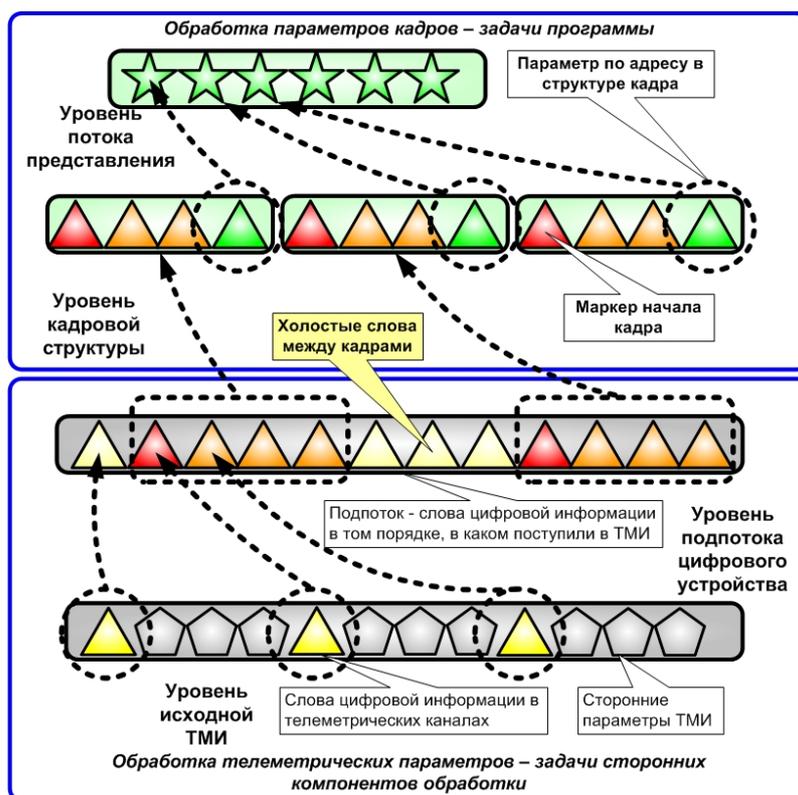


Рисунок 2 – Схема последовательности извлечения цифровых параметров

Figure 2 – Digital parameters extraction sequence

1. Формирование подпотока слов БНАП из исходной ТМИ (в реальном времени это репортажный поток ТМИ «индекс-параметр» (РП), в отложенном – полные потоки). Формирование подпотока слов БНАП представляет собой последовательное извлечение слов телеметрической информации, относящихся к навигационной аппаратуре. Формирование подпотока осуществляется из слов в том порядке, в каком они поступают с борта. Применительно к ре-

портажу задача формирования подпотока сводится к поиску параметра по индексу во входящем РП ТМИ формата «индекс-параметр».

2. Извлечение выходной кадровой структуры БНАП. Извлечение кадровой структуры основано на поиске маркеров и контрольных характеристик кадров. Большинство типов БНАП работают асинхронно ТМС. Асинхронность заключается в том, что размер выходного кадра БНАП не кратен размеру субкадра или цикла ТМС, а начало цифрового кадра БНАП не соответствует началу субкадра или цикла. Последовательным перебором слов подпотока БНАП осуществляется поиск маркера кадра, далее проверяется контрольная сумма (способ расчёта индивидуален для каждого типа бортовой аппаратуры). На данной стадии также отсекаются слова, не имеющие признака слова измерения. Результатом является последовательность кадров, выровненных по маркеру, исключающая излишние слова между соседними кадрами.

3. Обработка цифровых параметров БНАП, включающая следующее:

– извлечение параметров цифрового кадра. Способ извлечения того или иного параметра БНАП остаётся неизменным для конкретного типа устройств – задание на адресацию значений внутри кадра не требуется. Представление слов в БНАП (формат записи целочисленных величин) зависит от протокола сопряжения БНАП с ТМС и может отличаться от принятого в персональных компьютерах. Например, может отсутствовать дополнительный код для отрицательных значений, может требоваться перестановка порядка следования байтов («старшими вперёд»);

– преобразование кодов параметров в единицы физических величин. Преобразование заключается:

– в умножении на коэффициент («цена младшего разряда») – для параметров функционального типа – например, проекции вектора скорости или геоцентрические координаты. Хотя коэффициенты прямо заданы в методике обработки, имеется возможность их корректировать через исходные данные;

– маскировании слова – для логических признаков типа флага использования той или иной системы координат или флага готовности решения навигационной задачи в двух- или трёхмерном пространстве;

– оценке качества БНАП (здесь оценке подвергается не достоверность ТМИ, а решение навигационной задачи, поступившее с борта вместе со служебными данными БНАП – по флагам готовности и количеству спутников в решении);

– формировании выходного потока представления траекторных параметров (ППТП) для направления в комплексы-потребители.

Определение первичных величин в решении траекторной задачи

Таким образом, для графического представления и визуализации траектории потребуются следующие величины, выводимые из предшествующего решения навигационной задачи:

– геоцентрические координаты – для формирования следа траектории на трёхмерной модели на фоне Земли и звёздного неба. Не требуют дополнительных расчётов, имеются в составе кадра БНАП и, следовательно, в составе ППТП;

– модуль вектора скорости. Так как геоцентрическая система координат и стартовая связаны линейным аффинным преобразованием, модуль вектора скорости будет для них общим, следовательно, для его расчёта достаточно трёх проекций вектора, поступающих в составе ППТП в геоцентрической системе;

– ускорение (перегрузка) – рассчитывается как производная скорости по времени;

– широта и долгота – используются для формирования следа траектории на равнопромежуточной проекции карты;

– сферическая (эллиптическая) дальность от стартовой позиции до подспутниковой точки;

– высота (над земным эллипсоидом) – используется для графиков во времени и в следе траектории в осях сферической дальности и высоты.

Определение вторичных величин

Помимо «первичных» траекторных данных БНАП, содержащихся в ПТПП, потребуются дополнительные исходные данные, задаваемые для программы представления:

– модель земного эллипсоида, используемого для прямого и обратного перехода между геоцентрическими и геодезическими координатами (эллипсоид задаётся большой и малой полуосями либо большой полуосью и полярным сжатием);

– широта, долгота и высота стартовой позиции для расчёта сферической дальности до подспутниковой точки.

Расчёт указанных «вторичных» величин сводится к следующим преобразованиям:

– расчёт модуля вектора в пространстве по трём его составляющим – для вывода скорости;

– производная (численными методами) – для расчёта ускорения;

– перевод геоцентрических координат в геодезические по заданной точке в ГСК и параметрам земного эллипсоида;

– перевод геодезических координат в геоцентрические – для расчёта сферической дальности с помощью тригонометрических преобразований;

– расчёт сферической дальности между двумя точками, заданными долготой и широтой – по формулам Винценти;

– аффинное преобразование вектора координат для перехода между различными геоцентрическими системами (преобразование Гельмерта).

Далее рассматриваются математические расчёты по указанным подзадачам.

Математический расчет траекторных параметров

Расчет ускорения

Расчет ускорения производится как производная от скорости по времени:

$$a = \frac{dv(t)}{dt}.$$

Данная операция производится для каждой проекции вектора скорости, затем рассчитывается вектор ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

Расчет долготы

Долгота не зависит от полуосей эллипсоида и находится по следующим формулам:

– восточная долгота (на графиках следа траектории в равнопромежуточной проекции – положительная) при $Y_{ГСК} > 0$:

$$L = \begin{cases} \arctg \frac{Y_{ГСК}}{X_{ГСК}} \text{ при } X_{ГСК} > 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{ при } X_{ГСК} = 0 \\ \pi + \arctg \frac{Y_{ГСК}}{X_{ГСК}} \text{ при } X_{ГСК} < 0 \end{cases}$$

– западная долгота (на графиках следа траектории в равнопромежуточной проекции – отрицательная) при $Y_{ГСК} < 0$:

$$L = \begin{cases} \arctg \frac{Y_{ГСК}}{X_{ГСК}} \text{ при } X_{ГСК} > 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{ при } X_{ГСК} = 0 \\ \pi + \arctg \frac{Y_{ГСК}}{X_{ГСК}} \text{ при } X_{ГСК} < 0 \end{cases}$$

– на начальном (нулевом) меридиане при $Y_{ГСК} = 0$:

$$L = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{при } X_{\text{ГСК}} \geq 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{при } X_{\text{ГСК}} < 0 \end{cases}$$

Расчет широты

Для расчёта широты и высоты предварительно вычисляются радиус параллели R и вспомогательная угловая величина θ :

$$R = \sqrt{X_{\text{ГСК}}^2 + Y_{\text{ГСК}}^2}; \theta = \text{arctg} \frac{Z_{\text{ГСК}}}{R\sqrt{1-e^2}},$$

где e – эксцентриситет эллипсоида.

Геодезическую широту предлагается вычислять по следующей приближительной формуле:

$$B = \text{arctg} \left[\left(z + ae^2 \frac{\sin^3 \theta}{\sqrt{1-e^2}} \right) \frac{1}{R - ae^2 \cos^3 \theta} \right],$$

где a – большая полуось земного эллипсоида.

Данный способ вычисления широты имеет методическую погрешность не более 0,002" в любом диапазоне геодезических координат.

Расчет высоты

Высота (превышение над эллипсоидом) находится по формуле

$$H = \frac{X_{\text{ГСК}}}{\cos B \cos L} - N,$$

где $N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}$ – радиус кривизны первого вертикала.

Переход между системами координат

При обработке параметров БНАП зачастую возникает необходимость представления информации в разных геоцентрических системах координат на различных земных эллипсоидах. Поскольку информация от БНАП, как правило, поступает в системе WGS-84 (World Geodetic System 1984 – «Мировая геодезическая система»), то есть в системе, традиционно используемой для обработки параметров GPS, а представлять информацию требуется в системах ПЗ-90 (параметры Земли 1990 года) или СК-42 (эллипсоид Красовского 1942 года), при обработке параметров БНАП должно использоваться преобразование Гельмерта, с помощью которого осуществляется преобразование координат из одной СК в другую.

Преобразование Гельмерта для перехода из одной геоцентрической прямоугольной системы координат в другую имеет вид: $X_2 = (1 + \Delta m)A \cdot X_1 + B$, где X_2 – координаты в новой СК, X_1 – координаты в исходной СК; Δm – число, характеризующее отклонение масштабного коэффициента от единицы при переходе к новой СК, A – матрица поворота (матрица направляющих косинусов) вида:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} -$$

упрощенная формула, составленная из приближительного равенства синуса угла самому углу при малых значениях, где ω_x , ω_y , ω_z – углы поворота по осям при переходе к новой СК или

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} -$$

полная геометрическая формула, в которой

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \omega_z \cdot \cos \omega_y, \\ a_{12} &= \cos \omega_z \cdot \sin \omega_y \cdot \sin \omega_x + \sin \omega_z \cdot \cos \omega_x, \\ a_{13} &= \sin \omega_z \cdot \sin \omega_x - \cos \omega_z \cdot \sin \omega_y \cdot \cos \omega_x, \\ a_{21} &= -\sin \omega_z \cdot \cos \omega_y, \\ a_{22} &= \cos \omega_z \cdot \cos \omega_x - \sin \omega_z \cdot \sin \omega_y \cdot \sin \omega_x, \\ a_{23} &= \sin \omega_z \cdot \sin \omega_y \cdot \cos \omega_x + \cos \omega_z \cdot \sin \omega_x, \\ a_{31} &= \sin \omega_y, \\ a_{32} &= -\cos \omega_y \cdot \sin \omega_x, \\ a_{33} &= \cos \omega_y \cdot \cos \omega_x, \end{aligned}$$

B – сдвиг (вектор с координатами $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$).

Переход между системами координат осуществляется по схеме, изображенной на рисунке 3, т.е. через два преобразования Гельмерта подряд.



Рисунок 3 – Порядок преобразования геоцентрических координат
Figure 3 – Geocentric coordinate transformation sequence

В общей последовательности преобразования переход между геоцентрическими системами осуществляется до компонентов представления – после приёма ППТП в исходной системе, в которой работает БНАП. Переход между системами координат осуществляется только в программе представления БНАП, внешним потребителям осуществляется рассылка в исходной системе, в которой выдаёт результаты БНАП.

Поток представления траекторных параметров

Формат ППТП применяется для передачи результатов обработки БНАП от программ-обработчиков в программы графического представления траекторной информации. В реальном времени передача осуществляется через рассылку UDP на указанный адрес и порт, в отложенном времени – через файл. Формат кадра ППТП имеет следующий вид (язык C++, типы данных – для архитектуры процессора типа x86, выравнивание структуры – до байта):

```

#pragma pack(1)
//запись о навигационном спутнике
struct tSatInfo12 {
char numSat; //номер спутника, определяющий принадлежность к GPS или ГЛОНАСС
float SN; //уровень сигнал/шум, представляемый в дБ/кГц (по умолчанию – 0)
float tilt; //угол возвышения (если информация отсутствует, по умолчанию – 361);
char status; //состояние в обработке. Коды – согласно протоколу сопряжения
char NSS; //номер слова
float range; //псевдодальность от фазового центра антенны БНАП до спутника, м
float fDopler; //доплеровская частота, Гц
float dF; //приращение фазового интеграла на интервале времени dt
char flags; //от младшего бита – пригодность эфемерид, флаг здоровья спутника
char antenn; //номер антенны БНАП, по которому принят сигнал спутника
} //размер данной структуры – 25 байт
  
```

```

//кадр потока представления траекторных параметров
struct tTriFrame12 {
    long marker1;           // всегда должен быть равен 0x33333312
    unsigned short marker2; // всегда должен быть равен 0x0000 (отличие от РП ТМИ)
    char idSrc;             // идентификатор источника информации
    float zeitReg;          // относительное время регистрации кадра, с
    double zeitCoord;       // время решения навигационной задачи UTC (SU), в секунду от полуночи
    char quality;           // качество (оценка достоверности от 0 до 100 %)
    double Rx, Ry, Rz;      // три геоцентрические координаты (в метрах)
    double Vx, Vy, Vz;      // три проекции вектора скорости (в метрах в секунду)
    char numChannels;       // количество каналов ГНСС, предусмотренных в БНАП (от 12 до 50)
    float GF;               // геометрический фактор
    char flags; // от младшего бита – исправность аппаратуры, готовность данных, 3D-решение
    char Nsat; // количество каналов навигационных спутников (на практике – от 12 до 50)
    char reserve[16];       // зарезервировано
    unsigned short checksum; // контрольная характеристика – сумма всех байтов кадра ПППП,
                            // кроме данного атрибута checksum
    tSatInfo12 channels[]; // информация о каналах навигационных спутников – до 50 записей
};
//размер данной структуры – до 1343 байт (при 50 спутниковых каналах)

```

Заключение

В статье, помимо предложенного обобщенного алгоритма обработки и представления цифровых траекторных параметров бортовой навигационной аппаратуры потребителя, также предложен единый унифицированный формат потока представления траекторных параметров, рекомендуемый для передачи результатов обработки параметров БНАП от программ-обработчиков в программы графического представления траекторной информации. Использование предложенного формата в совокупности с применением рассмотренного алгоритма, содержащего этапы первичной обработки цифровых параметров БНАП, преобразования цифровых кодов параметров в единицы физических величин и формирования выходных структур БНАП, в значительной степени повышает точность и информативность оценки результатов полигонных испытаний в части траекторной информации.

Библиографический список

1. Спицын С. В., Товпеко А. В. Основные показатели качества систем сбора и обработки измерений при проведении пусков изделий РКТ // Международный научно-технический форум СТНО-2018: сб. тр. Т. 5. Рязань. 2018. С. 211-217.
2. Товпеко А. В. Архитектура и принцип действия системы управления измерительными средствами при обеспечении ракетных пусков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 79-89.
3. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. М.: Горячая линия, 2005.
4. Новиков Ю. А., Тимашев А. В., Филаткин С. В. Оценка эффективности систем сбора, передачи и обработки измерительной информации реального времени // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3/10. С. 17-20.

UDC 004.032.2

ALGORITHM FOR TRAJECTORY MEASUREMENT PROCESSING WHEN CARRYING OUT ROCKET LAUNCHES

S. V. Spitsyn, post-graduate student, RSREU, design engineer, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6468-5043, e-mail: spitsyn62@gmail.com

A. V. Tovpeko, senior specialist, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-9230-4316, e-mail: tovpeko.av@samspace.ru

S. A. Tikhomirov, assistant professor of RSREU, senior specialist, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3174-1536, e-mail: serge-tikhomirov@yandex.ru

A generalized algorithm to process and present digital trajectory parameters of onboard navigation equipment which is used to conduct rocket tests (field tests) is considered. The aim is to find a generalized algorithm to process digital parameters of on-board navigation equipment (BNAP) which is used in field tests of complex rocket and space technology products. The algorithm contains the stages of parameters pre-processing, digital parameter codes conversion into physical units, forming output BNAP structures, stages of primary and secondary values determination needed in trajectory problem solution, and also the stage of forming of unified digital trajectory measurements representation flow which is used to transfer BNAP parameters processing results to graphical representation environment.

Key words: information and measurement support of launches, system of measurement information collection, onboard navigation consumer equipment, TMI.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-118-126

References

1. **Spitsyn S. V., Tovpeko A.V.** Osnovnye pokazateli kachestva sistem sbora i obrabotki izmerenij pri provedenii puskov izdelij. *Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij forum STNO-2018: sb. tr.*, vol 5. Ryazan. 2018, pp. 211-217. (in Russian).
2. **Tovpeko A. V.** Arhitektura i princip dejstviya sistemy upravleniya izmeritel'nymi sredstvami pri obespechenii raketnyh puskov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 51, pp. 79-89. (in Russian).
3. **Yacenzov V. S.** *Osnovy sputnikovoj navigacii* (Basics of satellite navigation). Moscow: Goryachaya liniya, 2005. (in Russian).
4. **Novikov Yu. A., Timashev A. V., Filatkin S. V.** Ocenka effektivnosti sistem sbora, peredachi i obrabotki izmeritel'noj informacii real'nogo vremeni. *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2010, no. 3/10, pp. 17-20. (in Russian).