

УДК 681.3.06

## Алгоритм робастного оценивания результатов обработки цифровых массивов бортовых вычислительных комплексов изделий ДЗЗ

**А. В. Лобан**

*к. т. н, ОАО «Российские космические системы»*

*e-mail: aloban@mail.ru*

**Аннотация.** Рассматривается робастный алгоритм обработки цифровых массивов бортовых вычислительных комплексов, позволяющий повысить помехоустойчивость системы телеконтроля на фоне дестабилизирующих факторов. Приводится формализация задачи оценивания групп цифровых массивов, алгоритм оценивания (вербальный и в виде программы на языке C++), а также представлены результаты его работы в составе комплекса обработки телеметрии по реальному изделию ДЗЗ.

**Ключевые слова:** алгоритм, робастные оценки, плотность распределения, гистограмма, дестабилизирующие факторы, цифровой массив

## The Algorithm of Robust Estimation of Results of Digital Processing of Digital Arrays Onboard Computing Systems for Space Remote Sensing

**A. V. Loban**

*candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"*

*e-mail: aloban@mail.ru*

**Abstract.** Considered robust algorithm of digital arrays onboard computing systems that improve the immunity system of telecontrol on the background of destabilizing factors. Formalization of the problem of estimating groups of digital arrays, the estimation algorithm (verbally and in the form of a program in C++), and presents the results of his work in the complex processing of telemetry for real-product of RS.

**Key words:** algorithm, robust estimation, frequency distribution, histograms, destabilizing factors, digital array

## Введение

Характерной особенностью большинства существующих и вновь разрабатываемых сложных динамических объектов (СДО), решающих задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), является то, что все большую часть общего потока телеметрической информации (ТМИ) занимает «программная» телеметрия, формируемая на объекте в виде массивов бортовых вычислительных комплексов (БВК). Так, для примера по одному из новых изделий ДЗЗ число параметров «приборной» телеметрии составляет около 2000, а число параметров «программной» телеметрии — около 6000.

Массивы БВК передаются в полном потоке ТМИ по отдельным позициям телеметрического кадра. Причем в зависимости от разрядности программного регистра и способа передачи массивов выделяется соответствующее число позиций кадра. Кроме того, на объекте может быть одновременно несколько видов программных регистров и интерфейсов их встраивания в общий поток информации телеконтроля.

В данной статье рассматривается один из способов передачи массивов БВК с помощью регистра «ЗУПР». Суть способа состоит в следующем: массив БВК, накопленный на борту на «невидимых» сеансах, разбивается на группы по 130 байт и затем передается в режиме воспроизведения (ВП) группа за группой несколько раз (пока включен режим ВП). Например, на реальном сеансе накоплены группы с номерами от 0 до 255, повторены в режиме ВП 48 раз. В случае когда в тракте доставки полного потока ТМИ отсутствуют дестабилизирующие факторы (сбои, разрывы поступления информации по времени и др.), достаточно выделить одну любую из поступивших последовательностей групп и «нарезать» отчеты из цифрового массива БВК.

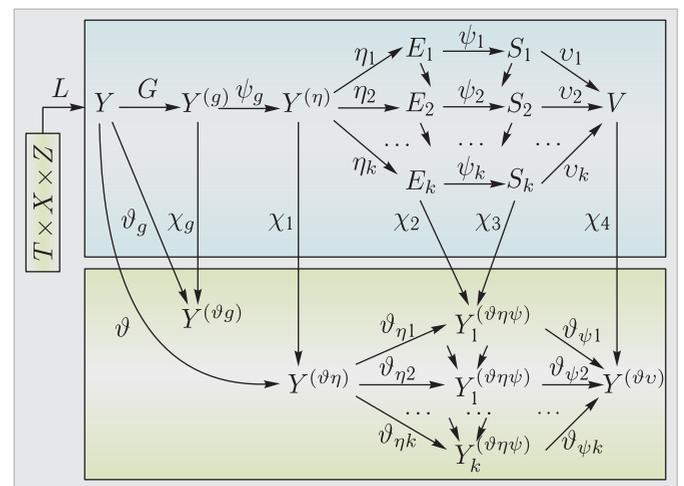
Однако на практике рассчитывать на такую ситуацию нельзя, ввиду того, что сбойные точки-отсчеты присутствуют практически на любом сеансе телеконтроля. Как наиболее рационально использовать особенности такого способа передачи массивов БВК и какой должен быть алгоритм оценивания поступивших групп, чтобы обеспечивалась робастность оценок (устойчивость к воздействию помех с неизвестным законом распределения)? В статье дается ответ на эти вопросы.

## Формализация задачи

Полный поток ТМИ содержит совокупность телеметрических кадров, по отдельным позициям которых (каналам группового сигнала) вставляется информация с «программных регистров» БВК. Как правило, процесс «вставки» массивов БВК асинхронный. Рассматриваемый способ характерен тем, что часть массива БВК (группа — 128 байт, плюс 2 байта — номер группы) передается в одном кадре, в следующем кадре — следующая группа и т. д. до тех пор, пока не будут переданы все группы. Затем процесс повторяется заново и так до конца режима ВП сеанса обработки.

Ввиду того, что на разных участках сеанса связи воздействие дестабилизирующих факторов на поток ТМИ различно, возникает задача оценивания результатов обработки информации телеконтроля в виде выделенных групп общего цифрового массива БВК. Лишь после ее решения можно приступить к «нарезке» массива БВК на множество массивов регистра (номенклатуру отчетов) — результаты диагностирования подсистем СДО на борту.

В соответствии с этим принятие решения о виде поступившего отчета получается многослойным и представимо с помощью математической структуры переработки цифрового массива БВК [1, 2]:



(1)

где  $T$  — множество моментов времени телеконтроля объекта;

$X, Y$  — множества входных и выходных сигналов объекта соответственно;

- $Z$  — множество состояний объекта;
- $L$  — отображение «наблюдения» СДО;
- $G$  — отображение «наблюдения» групп массива БВК;
- $\chi_g$  — отображения импликации группирования;
- $Y^{(\vartheta g)}$  — фактор-множество  $Y^{(g)}$  каналов группирования цифровой информации регистра БВК;
- $Y^{(\vartheta \eta)}$  — фактор-множество  $Y^{(\eta)}$  каналов массива цифровой информации БВК;
- $\psi_g$  — отображение робастного оценивания групп массива БВК;
- $Y_i^{(\vartheta \eta \psi)}$ ,  $i = \overline{1, k}$  — фактор-множество классифицированных и истинных отчетов БВК;
- $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$  — отображения импликации классифицирования, оценивания и визуализации отчетов БВК;
- $E_i, S_i$ ,  $i = \overline{1, k}$  — множества заданных и истинных отчетов БВК;
- $\eta_i, \psi_i, \nu_i$ ,  $i = \overline{1, k}$  — отображения классифицирования, оценивания и визуализации отчетов БВК;
- $Y^{(\vartheta \nu)}$  — фактор-множество формуляров визуализации  $V$ ;
- $\vartheta, \vartheta_g, \vartheta_{\eta_i}, \vartheta_{\psi_i}$ ,  $i = \overline{1, k}$  — отображения факторизации выделения, группирования, стратифицированного классифицирования и оценивания соответственно.

Реализация процесса (1) заключается в осуществлении трех последовательно выполняемых этапов. На первом этапе формируются фактор-множества  $Y^{(\vartheta g)}$ ,  $Y^{(\vartheta \nu)}$ ,  $Y_i^{(\vartheta \eta \psi)}$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $Y^{(\vartheta \nu)}$  по группам и отчетам массива БВК, а также множество видов отчетов  $E_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ . Эти сведения составляют стратифицированную модель «программной» телеметрии БВК (нижняя часть структуры). Модель содержит данные о том, как выделить из полного потока ТМИ цифровые группы массива программного регистра, как объединить группы в единый массив, опознать отчеты («нарезать» массив на отчеты), описать цифровые параметры, входящие в отчеты. Сведения берутся из конструкторской документации на СДО.

На втором этапе выполняется отображение  $G$  «наблюдения» групп массива БВК, причем соблюдается условие  $G\chi_g = \vartheta_g$ . Затем выделенные группы оцениваются с помощью отображения  $\psi_g$  для сборки общего массива БВК ( $\psi_g: Y^{(g)} \rightarrow Y^{(\eta)}$ ).

В данной статье рассматривается робастная процедура оценивания, не зависящая от ограничений на виды распределений помех, которые присутствуют в цифровой информации групп множества  $Y^{(g)}$ .

Третий этап заключается в определении видов реальных отчетов массива БВК по телеизмерениям и включает выполнение отображений  $\eta_i, \psi_i, \nu_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Структура (1) дает наглядное представление о процессах выделения, классифицирования, оценивания и визуализации отчетов БВК, а также о функционально достаточном составе и структуре алгоритмов подготовки исходных данных и переработки информации цифровых массивов. Важно отметить, что для компактного хранения и обмена данными имеется возможность фиксировать результаты переработки в сечении перед множеством  $V$ , т.е. без визуализации. При этом объем данных результатов сокращается в несколько раз. Например, если группы, образующие массив БВК, повторяются 30–50 раз на сеансе обработки, то коэффициент сжатия «программной» телеметрии тоже будет таким же.

Пусть массив БВК передается с помощью  $m$  групп по 128 байт каждая  $n$  раз за сеанс, т.е. состояние массива определяется  $mn$ -мерным вектором  $y^{(g)} \in \mathbb{R}^{mn}$ . Пространство  $\mathbb{R}^{mn}$  — пространство состояний массива БВК. В результате процесса телеконтроля (отображение  $G$ ) определяется значение  $y^{*(\eta)}$  вектора  $y^{(\eta)} \in \mathbb{R}^m$ . Пространство  $\mathbb{R}^m$  — пространство измеряемых параметров. Задано однозначное отображение  $H: \mathbb{R}^{mn} \rightarrow \mathbb{R}^m$ , определяемое вектор-функцией  $y^{(g)} = H(y^{(\eta)})$ , где  $H(y^{(\eta)})$  — истинное значение вектора измеряемых параметров, когда массив находится в состоянии  $y^{(g)}$ .

Измеренное значение  $y^{*(\eta)}$  отличается от истинного значения  $H(y^{(\eta)})$  на вектор ошибок измерений  $\rho \in \mathbb{R}^m$ , т.е.  $y^{*(\eta)} = H(y^{(\eta)}) + \rho$ .

Оцениваемый параметр выделяется заданием отображения  $\delta: Y^{(g)} \rightarrow Y^{(\eta)}$ , определяемого функцией  $\delta = \delta(y^{(g)})$ .

В результате отображения оценивания  $\psi_g: Y^{(g)} \rightarrow Y^{(\eta)}$  каждому  $y^{*(\eta)}$  ставится в соответствие число  $\widehat{\delta} = \psi_g(y^{*(\eta)})$ , называемое оценкой параметра  $\delta$ . Предполагаются неизвестными

характеристики вероятностного распределения ошибок измерений.

Задача состоит в том, чтобы найти такое отображение оценивания (процедуру, алгоритм), при котором модуль разности  $|\delta - \widehat{\delta}|$  оказывается в некотором смысле наименьшим.

Постановка задачи близка к классическим способам минимаксного оценивания при неизвестной корреляции ошибок измерений [3] (оценивание методом наименьших квадратов, задача о наилучшей корреляции, использование методов линейного программирования и др.). Однако следует учитывать, что взаимная корреляция отдельных байт, входящих в группу цифровых данных, практически отсутствует. Измерения, передаваемые в составе отдельной группы, нельзя сжать, а значит, повысить их достоверность.

Учитывая это, предлагается робастный алгоритм оценивания групп, основная идея которого состоит в следующем. В процессе оценивания поступивших на сеансе групп строится гистограмма частоты повтора значений кода каждого байта, входящего в группу. В качестве результата формируются группы, у которых входящие байты характеризуются максимальной частотой повторения значений кодов. По существу, это первый шаг робастной процедуры оценивания — «редактирование» данных усечением выделяющихся наблюдений по некоторому правилу [4], в данном случае по частоте повторов. Полученный результирующий массив БВК можно подвергнуть разбору на содержащиеся в нем отчеты. Этот короткий путь получения результатов хорошо работает в случае, когда уровень сбоев сравнительно невелик. Если больше ничего не предпринимать, то это обычная процедура оценивания, которая допускает на выходе грубые ошибки при значительном влиянии дестабилизирующих факторов.

Робастная процедура должна минимизировать максимальное ухудшение (минимаксная процедура). Поэтому в качестве следующего шага необходимо количественно и качественно оценить результаты процедуры, «а затем последовательно провести переподгонку до тех пор, пока не появится сходимости» [4]. Качественная оценка — это когда «нарезка» на отчеты происходит успешно. Количественные оценки можно связать с частотой

повторов значений кодов байтов группы, а также количеством сформированных отчетов при «нарезке» массива БВК. Так, например, если байт, входящий в группу, имеет два различных значения с примерно равной максимальной частотой, то при подгонке следует получить результат оценивания для каждого случая, затем выбрать вариант с большим количеством сформированных отчетов. Целесообразно также сопроводить результаты обработки количественной оценкой робастности.

## Практическая реализация

При постановке объекта ДЗЗ на информационно-телеметрическое обслуживание (при подготовке исходных данных по документации на изделие) для обработки массивов БВК формируются три структуры данных (см. рис. 1): описание регистров (МВК), номенклатура отчетов по регистрам (ТОФ) и перечень параметров отчетов (ТУПФ).

Структуры иерархически упорядочены и позволяют описать для каждого «программного» регистра состав массивов и состав параметров для отчетов. Причем параметры цифровых отчетов и манипуляции с ними описываются по общим правилам типового комплекса программ обработки телеизмерений (ТХР — таблица характеристик параметров, вход по условному номеру параметра — УН). По существу, после подготовки исходных данных формируется модель отчетов БВК, представленная соответствующими компонентами в нижней части структуры (1).

Этих данных достаточно, чтобы выделить из общего потока телеметрии каналы, по которым передаются цифровые массивы БВК (отображение  $L$  «наблюдения» СДО), сформировать группы (отображение  $G$  «наблюдения» групп массива БВК), проверить монотонность поступления групп, оценить (проголосовать) группы, собрать общий массив БВК и затем его обработать.

Суть обработки массива БВК после операции оценивания групп состоит в том, чтобы выделить из массива слов отчеты и нужные параметры и представить пользователю в удобном виде. В настоящее время накоплен опыт представления

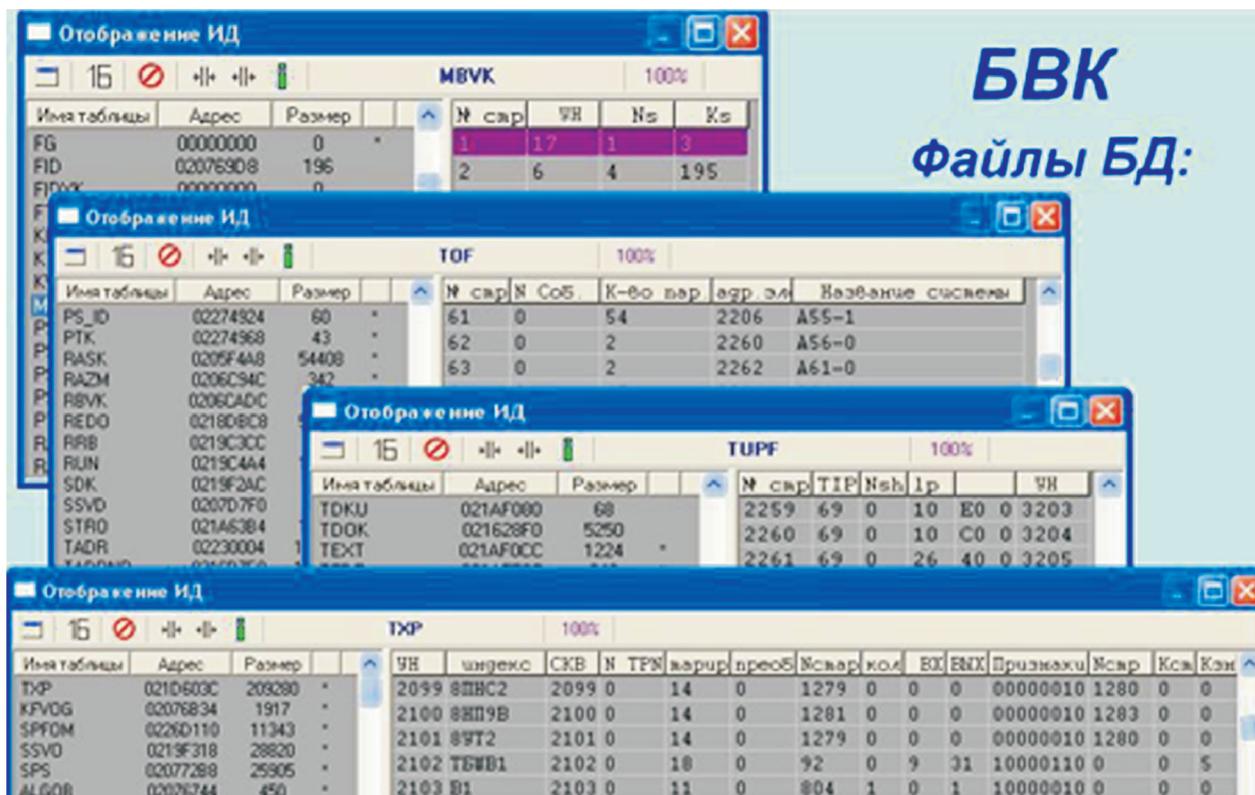


Рис. 1.

результатов обработки (визуализации) в следующих видах:

- ✓ последовательность массивов в виде «экспресс-отчета» с распечаткой параметров в физических величинах и в двоичном виде;
- ✓ отчеты после «фильтрации» по контролируемым системам СДО;
- ✓ таблицы групп параметров (например, баллистический вектор);
- ✓ обобщенные формуляры контроля основных событий работы СДО и др.

Алгоритм оценивания групп массива БВК и «нарезки» отчетов реализован в виде программы на языке С++ (см. таблицу) и используется на практике по одному из изделий ДЗЗ. Анализ воздействия сбоев на цифровые данные группы с номером 007Е (см. рис. 2) показывает, что отдельные биты искажены (соответствующие слова массива помечены символом \* — звездочкой на правой части рисунка) по сравнению с массивом,

полученным в результате процедуры оценивания. На рисунке представлены 32 слова группы 007Е в 16-ричном и битовом форматах. На правом поле показан пример воздействия помех на отдельные биты массива. За эталонную распечатку (левое поле рисунка) взято представление этой же группы массива после оценивания разработанным алгоритмом.

Воздействие помех на группы различно для разных участков сеанса обработки. Поэтому необходимо брать при оценивании все поступившие повторы групп для получения устойчивых результатов обработки массива БВК.

Воздействие сбоев по разному отражается на отчеты после их «нарезки» из массива БВК. Так, например, сбой в 18-м слове (код '12С91ААА' изменен на код '12С918АА') приведет к тому, что массив отчета не будет опознан, так как испорчена константа-маркер начала массива 'ААА'.

Если же сбой воздействует на биты внутри отчета, то искажаются лишь значения отдельных параметров (помечены символом \* — звездочка) отчета (см. рис. 3).

## Таблица.

## Алгоритм (программа) оценивания цифровых массивов БВК

```

unsigned char s[512], out_n, nsl;
int lpup, lpup, ngmin, ngmax;
char * p_zup, p_pup;
union {unsigned long l; int in; unsigned char m[4]; }rez;
int mg[130][256]; // Массив для голосования групп
//
lpup = (ngmax - ngmin + 1)*130;
if(lpup > 130) { // Страница ЗУП
(char*)p_pup = new char[lpup];
memset(p_pup, 0, lpup);
for(j=ngmin; j<= ngmax; j++) { // от ngmin -> до ngmax
for(k=0; k < 130; k++) {for(l=0; l < 256; l++) {mg[k][l] = 0; }}
mn = 0; // Обнуление полей статистики
for(i=0; i < (lpup/130); i++) {
memcpy(&s[0], p_zup+i*130, 130);
rez.m[0] = s[1]; rez.m[1] = s[0]; rez.m[2] = 0; rez.m[3] = 0;
nt = rez.in; // Текущий номер группы
if(j==nt) {
for(k=0; k < 130; k++) { // Номер байта в группе
l = s[k]; // Значение байта
mg[k][l]++; // Число повторов (набор статистики)
} } }
memset(&s[0], ' ', 256);
rez.in = j; // Текущий номер группы
s[1] = rez.m[0]; s[0] = rez.m[1];
for(k=2; k < 130; k++) { // Номер байта в группе
nt = 0;
for(l=0; l < 256; l++) { // Наиболее вероятное значение байта
if(mg[k][l] > nt) {nt = mg[k][l]; mn = l; }
}
rez.in = mn;
s[k] = rez.m[0]; // Значение байта
}
memcpy(p_pup+lpup-j*130-130, &s[0], 130);
} // К следующей группе
nz = 0; // Число отчетов БВК
out_n = 0; // Буфер накопления в исходное
//
for(j=0; j < (lpup/130); j++) {
memset(&s[0], 0, 256);
for(i=0; i < 32; i++) {
memcpy(&s[i*4], (p_pup+lpup-j*130-i*4-4), 4);
}
for(i=0; i < 32; i++) { // Группа 128 байт регистра БВК
if(out_n==0) { // Поиск начала массива
memset(&s[256], 0, 256);
s[256+0]=s[(4*i)+3]; s[256+1]=s[(4*i)+2];
s[256+2]=s[(4*i)+1]; s[256+3]=s[(4*i)+0];
if( ((s[256+1]&0x0F)==0x0A)&&((s[256+0]&0xFF)==0xAA) ) {
out_n = 1; // Признак начала массива
} }
else {
nsl = (s[256+3] >> 2)&0x3F;
if(nsl > out_n) { // Число слов 6 разрядов
s[256+out_n*4+0]=s[(4*i)+3]; s[256+out_n*4+1]=s[(4*i)+2];
s[256+out_n*4+2]=s[(4*i)+1]; s[256+out_n*4+3]=s[(4*i)+0];
out_n++;
if(nsl == out_n) {
... // Запись накопленного массива в БД
nz++; // Число сформированных отчетов БВК
out_n = 0; // Буфер накопления в исходное
} } } } }
} } } } }

```

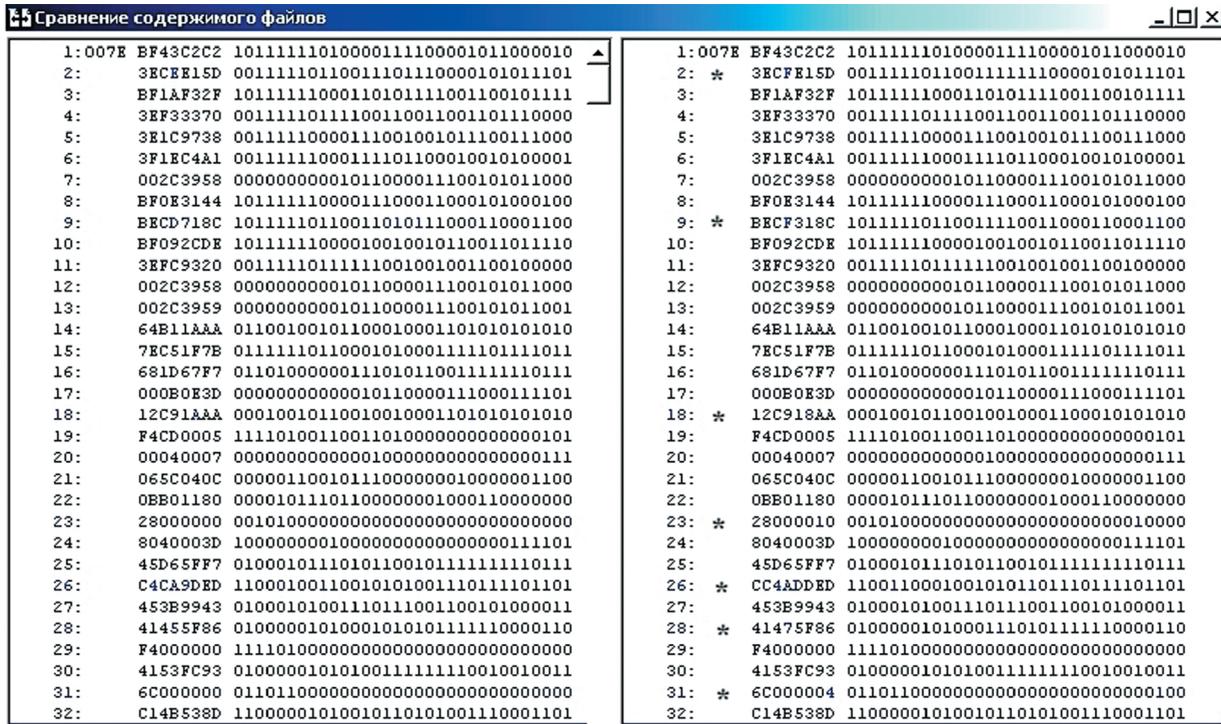


Рис. 2.

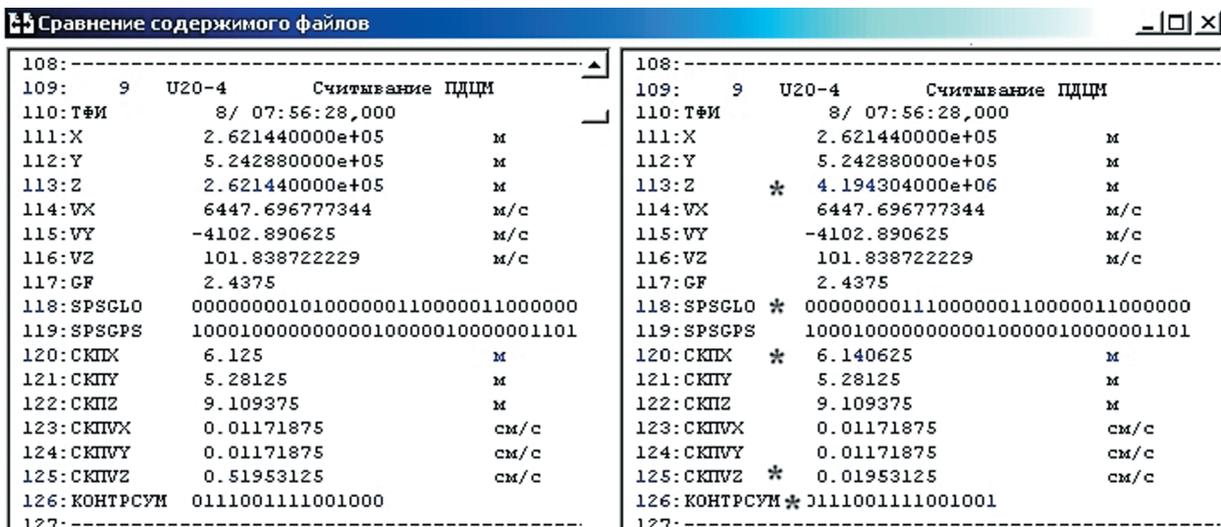


Рис. 3.

В приведенном примере (справа на рис. 3) показан результат формирования отчета «U20-4» с важными для баллистических расчетов данными. Кроме параметра «Z» искажение коснулось параметра «КОНТРСУМ», что свидетельствует о присутствии аномальных измерений по критерию проверки на совпадение контрольной суммы отчета.

### Заключение

Предложенная формализация и практическое апробирование моделей и алгоритма робастного оценивания результатов обработки массивов БВК показывают, что предпочтительным является подход реализации обработки «программой»

телеметрии в рамках типовой технологии сбора и обработки телеизмерений, причем практика требует, чтобы методы обеспечения робастности преобразований сводились к достаточно простым приемам и не нуждались в коренной переделке тех программ, которые сейчас используются.

Выделение, группирование, классифицирование, оценивание и визуализацию отчетов БВК целесообразно реализовывать в виде компонентов согласно предлагаемой структуре (1), используя существующий апробированный интерфейс взаимодействия типовых средств комплекса обработки телеметрии.

Высокая помехоустойчивость робастного алгоритма оценивания групп массива БВК позволит обрабатывать данные телеконтроля в сложной помеховой обстановке и тем самым даст возможность получать устойчивые результаты обработки отчетов БВК. Реализуемость и возможность практического применения предлагаемого алгоритма доказана на примере обработки телеметрии по реальному

изделию ДЗЗ. Применение подобных алгоритмов предполагает существенное увеличение эффективности информационных технологий, прежде всего за счет повышения их помехоустойчивости.

## Список литературы

1. Лобан А. В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. М.: ДПК Пресс, 2015. 144 с. ISBN 978-5-91976-069-6.
2. Лобан А. В. Новая эффективная технология распределенной переработки измерительной информации в АСУ космическими аппаратами // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. М., 2014. № 4. С. 81–88.
3. Лидов М. Л. Минимаксные методы оценивания // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2010. № 71. 87 с. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-71>
4. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.