

Модернизация алгоритмов получения обобщенных данных при комплексировании методов разнесенного приема и декодирования данных

В. Л. Воронцов, к. т. н., a762642@yandex.ru

филиал АО «ОРКК»–«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены некоторые аспекты комплексирования методов разнесенного приема и помехоустойчивого кодирования (декодирования) для случаев, когда декодирование ориентировано на мягкое решение при демодуляции (в частности, на декодирование по алгоритму Витерби). Так как разработанные алгоритмы получения обобщенных данных A_4 и A_{42} , адаптирующиеся к изменяющимся во времени условиям помеховой обстановки и обеспечивающие высокую достоверность данных, ориентированы на жесткое решение, то для осуществления вышеупомянутого комплексирования требуется их модернизация. Показаны сущности этой модернизации, обоснована ее правомерность. С модернизацией связано формирование оценок надежности принятых символов (в частности, символов в виде аналоговых реализаций четырехпозиционного сигнала), причем в неблагоприятных условиях, порождаемых (как экспериментально установлено) систематическими ошибками, вызванными помехами, действующими в канале связи.

Ключевые слова: алгоритмы получения обобщенных данных, аналоговая реализация четырехпозиционного (двухпозиционного) сигнала, жесткое решение, методы помехоустойчивого кодирования (декодирования), методы разнесенного приема, мягкое решение, символ

Modernization of Algorithms for Generalized Data Reception at Complexation of Diverse Reception Methods and Data Decoding

V. L. Vorontsov, *Cand. Sci. (Engineering)*, a762642@yandex.ru

*A branch of Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation"–
"Institute of Space Device Engineering", Moscow, Russian Federation*

Abstract. Several aspects of complexation of the methods of diverse reception and noiseless coding (decoding) for the cases when decoding is oriented to the relaxed solution at demodulation (in particular, to the decoding based on the Viterbi algorithm) are considered. Since the developed methods for reception of the generalized data A_4 and A_{42} adaptable to conditions of the jamming environment changing during the time and providing a high data reliability are guided to the tough solution, so to fulfill the above-mentioned complexation, their modernization is needed. The essences of this modernization are shown and its justification is proved. Modernization is associated with the formation of the reliability estimations of the received symbols (most notably, the symbols in the form of analogue realization of the four-position signal) in unfavorable conditions caused (as it was experimentally established) by systematic errors generated by the noises in the communication channel.

Keywords: algorithms for generalized data reception, analogue realization of the four-position (two-position) signal, tough solution, noiseless coding (decoding) methods, diverse reception methods, relaxed solution, symbol

В работах [1] и [2] показано, что методы разнесенного приема и методы помехоустойчивого кодирования (декодирования) в принципе не являются альтернативными. Более того, при их комплексировании возможности улучшения достоверности возрастают. При этом необходимо соблюдать некоторые правила. В частности, в случае последовательного применения сначала получают обобщенные данные, а затем осуществляют их декодирование. Такой подход позволяет рационально использовать возможности комплексирования; он актуален в случае применения весьма результативных алгоритмов получения обобщенных данных A_4 и A_{42} [1, 2], адаптирующихся к изменяющимся во времени условиям помеховой обстановки, и последующего декодирования, ориентированного на жесткое решение при демодуляции.

Однако если декодирование ориентировано на мягкое решение при демодуляции (в частности, декодирование по алгоритму Витерби), то требуется модернизация алгоритмов A_4 и A_{42} [3] (в случае их применения). При этом необходимо, чтобы формат (структура) данного на выходе программно-технических средств формирования обобщенных данных или на входе декодера при традиционном мягком декодировании были одинаковы. Компоненты такого данного четко разграничены. Оно состоит из элементарного данного и его оценки, а именно: его старшие биты (разряды) относятся к информационному данному, выделенному из определенного принятого символа, или аналоговой реализации цифрового сигнала (относятся к элементарному данному — в терминах [1–3]), а младшие биты (разряды) — к оценке надежности этого символа (этой аналоговой реализации цифрового сигнала, или этого элементарного данного).

Цель работы — рекомендации по формированию обобщенных данных для последующего декодирования, ориентированного на мягкое решение при демодуляции.

В работе [3] рассмотрен пример трехбитового выходного данного восьмиуровневого мягкого модема для модернизированного алгоритма A_{42} (см. рис. 7.8 и пояснения к нему [4]), рис. 1 аналогичен рис. 7.8 из [4].

В табл. 1 e_i — значения элементарного однобитового данного i -го канала разнесения (0 и 1);

в крайнем левом столбце оценок e_i — оценки наиболее надежных элементарных данных «0» и «1», а в крайнем правом — наименее надежных. Значения этих оценок условны, они не обязательно должны быть такими же при схемной реализации соответствующих программно-технических средств. Эти значения выбраны прежде всего для наглядности. Их суть связана с евклидовым расстоянием, характерным для мягкой схемы декодирования (а не с хэмминговым расстоянием, как в случае использования жесткой схемы декодирования) [4].

Таблица 1. Значения элементарных однобитовых данных e_i и соответствующих им двухбитовых оценок

e_i	Оценки e_i			
0	00	01	10	11
1	11	10	01	00

Последующее формирование обобщенных данных нужно осуществлять по алгоритму A_4 (A_{42}), причем — как обычно — с использованием лишь элементарных данных, поступивших из каналов разнесения [1, 2]. Если в блок обобщенных данных выбрано элементарное данное $e_{об}$ и при этом элементарные данные с таким же значением, соответствующие одному и тому же переданному данному и вышеупомянутому обобщенному данному $e_{об}$, поступили из i_1, \dots, i_h -каналов разнесения, то к этому обобщенному данному присоединяют данное оценки надежности символа одного из каналов i_1, \dots, i_h , значение которого соответствует наиболее надежному символу (элементарному данному). В результате такого присоединения образуется данное $e_{об_оц}$, структура которого аналогична структуре выходного данного мягкого модема (табл. 2). То есть форматы слов (данных) $e_{об_оц}$ и $e_{i_оц}$ одинаковы (где $e_{i_оц}$ — данное, содержащее оценку надежности принятого символа, поступившее из i -го канала разнесения).

Так, например, в случае, описанном в первой строке табл. 2, $e_{об}$ равно 1, наилучшая оценка надежности — 11 (она относится к пятому каналу разнесения), а данное $e_{об_оц}$ — 111.

Правомерность установленного порядка выбора оценок надежности для обобщенных элементарных

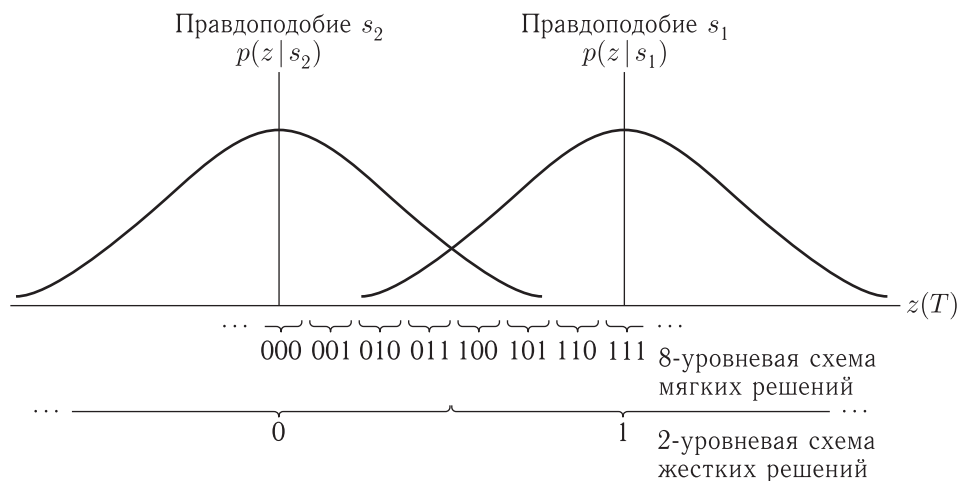


Рис. 1. Графики, поясняющие работу жесткой и мягкой схем декодирования

Таблица 2. Пример, иллюстрирующий формирование обобщенных данных $e_{об_оц}$ при осуществлении модифицированного алгоритма A_{42}

$e_{об}$	Оценки надежности символов для каналов разнесения, $i =$					$e_{об_оц}$
	1	2	3	4	5	
1	—	01	00	—	11	111
0	—	—	—	—	01	001
0	10	10	01	11	—	001
...

данных связана с сущностями оценок надежности символов (оценок надежности элементарных данных), относящихся к отдельному каналу разнесения (в частности, показанных на рис. 1), а также с особенностями выбора элементарных данных в обобщенный массив при осуществлении алгоритма A_4 (A_{42}) [1, 2].

Чем ближе значение принятого сигнала z к какой-либо позиции идеального сигнала («0» или «1» — для рассматриваемого примера, см. рис. 1), тем меньше вероятность его ошибочного опознавания. Справедливо также следующее утверждение: наиболее достоверным элементарным данным чаще всего соответствуют наименьшие отклонения принятых сигналов z от их идеальных значений. С другой стороны, достоверность, обеспечиваемая алгоритмами A_4 и A_{42} , не хуже, чем при автовыбо-

ре (т. е. $P_{ош_i} \geq P_{ош_об}$, $i = 1, 2, \dots, n$, где $P_{ош_i}$ — вероятность ошибки опознавания в i -м канале разнесения, $P_{ош_об}$ — вероятность ошибочного элементарного обобщенного данного) [1]. Если, например, из n блоков данных, поступивших из каналов разнесения и соответствующих одному и тому же переданному блоку данных, минимальное количество недостоверных элементарных данных (по сравнению с остальными блоками) содержится в n -м блоке, но при этом $P_{ош_n} > P_{ош_об}$ и обобщенные данные получены с использованием алгоритмов A_4 и A_{42} , то оценки надежности элементарных данных n -го блока должны быть хуже, чем оценки блока полученных обобщенных данных, выбранных из оценок, соответствующих элементарным данным i_1 -го, ..., i_h -го каналов разнесения. То есть логично, что оценки достоверности обобщенных элементарных данных, полученных с использованием алгоритмов A_4 и A_{42} , не хуже, чем при автовыборе.

Актуальна нормализация принятого сигнала.

В работе [5] показана суть нормализации принятого четырехпозиционного телеметрического сигнала (рис. 2), заключающейся в приведении значений телеизмерений каждого канала разнесения к единой шкале измерений (к номинальным уровням).

Из табл. 3 следует, что в случае вышеупомянутой нормализации выбор двух старших разрядов двоичного восьмиразрядного слова, соответствующего аналоговой реализации четырехпозиционного сигнала (см. рис. 2), равносильно применению

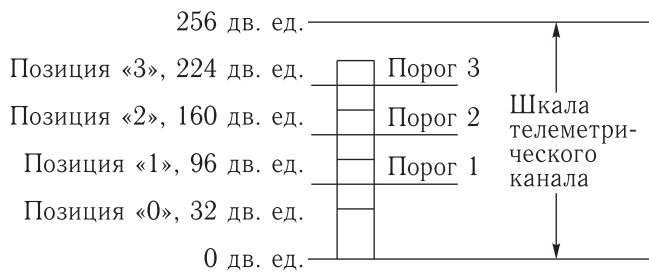


Рис. 2. Эпюра четырехпозиционного сигнала с номинальными значениями уровней позиций

порогового разделения (равносилён опознанию данных). При этом значения порогов 1, 2 и 3 соответственно равны 63,5, 127,5 и 191,5 двоичных единиц. При таких нормализации и опознании обеспечивается весьма высокая достоверность, если помеховая составляющая принятого сигнала аддитивна, а ее математическое ожидание равно нулю [5]. Также (что очень важно) обеспечивается четкое размежевание фрагментов данных, относящихся к оценкам надежности элементарных данных, и самих элементарных данных.

Таблица 3. Результаты представления значений номинальных уровней позиций четырехпозиционного сигнала в двоичном виде

№ позиции	Значения уровней позиций в дв. ед.	Значения разрядов							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	32	0	0	0	0	0	1	0	0
2	96	0	0	0	0	0	1	1	0
3	160	0	0	0	0	0	1	0	1
4	224	0	0	0	0	0	1	1	1

Сведения об оценках надежности содержатся во фрагменте b_e слова e , показанного в табл. 3, — с 1-го по 6-й разряды. Суть их — характеристики отклонения принятого четырехпозиционного сигнала от его номинального уровня. Они (характеристики) являются исходными сведениями для получения оценок надежности элементарных данных в требуемом для последующего декодирования формате. С точки зрения цели настоящей работы установление этого формата преждевременно.

Однако следует обратить внимание на некоторые особенности, связанные с ним.

Так, из-за несимметричности канала связи действия помех с отрицательным знаком и с положительным знаком на позиции «0» и «3» соответственно не приводят к ошибкам при рассмотренном выше опознании данных (см. рис. 2). В этих случаях значения отклонений принятого четырехпозиционного сигнала от его номинальных уровней «0» и «3» (соответственно от уровней 32 и 224 дв. ед.) не важны [6]. Из-за несимметричности (в частности, вышеупомянутой) при искаженном принятом четырехпозиционном сигнале возможны двойные битовые ошибки. Например, если передана позиция «2» (10), а опознана позиция «1» (01), и наоборот, передана «1», а опознана «2». Чтобы уменьшить вероятности таких ошибок, применяют модуляционные коды Грея [4]. Например, для рассмотренного четырехпозиционного сигнала (см. рис. 2) в этой связи целесообразно определить следующее соответствие между номером позиции и двоичными разрядами элементарного данного: «0» — 00, «1» — 01, «2» — 11, «3» — 10. Тогда вероятность двойной битовой ошибки существенно снизится (см. пример выше); имеем одинарную битовую ошибку: передана позиция «2» (11), а опознана позиция «1» (01), и наоборот. Показано [6], что устранения несимметричности также можно добиться смещением уровней первого и третьего порогов в стороны соответствующих номинальных уровней крайних позиций. Однако при этом достоверность данных ухудшается, что неприемлемо.

В рассмотренном случае (см. табл. 3) данное b_e содержит информацию об оценке надежности элементарного данного, представленного двумя старшими битами (разрядами) — седьмым и восьмым. Однако возможен формат данного $e_{об.оц}$, необходимый для последующего декодирования, в котором элементарное данное не двухбитовое, а однобитовое. Это означает, что появляется необходимость формирования из каждого исходного слова, содержащего двухбитовое элементарное данное, двух слов, в каждом из которых к биту элементарного данного прикрепляется данное оценки его надежности (данное типа b_e). Предполагается, что сущности такого формирования будут определены в перспективе.

В зависимости от требуемой точности оценок надежности устанавливается разрядность данного типа b_e . Для закругления оценок нужно всего лишь отбросить его младшие разряды.

Рассмотрены некоторые практические аспекты, касающиеся обоснования требуемой точности оценок надежности типа b_e , связанные с нормализацией принятого четырехпозиционного телеметрического сигнала (см. рис. 2).

Экспериментально установлено [5], что качество нормализации, осуществляемое аппаратно в наземных приемно-регистрирующих станциях (ПРС) типа БРС-4 (БРС-4М, БРС-4МК), недопустимо низкое. Имеет место большой разброс значений телеизмерений, принятых разными ПРС, заданными для приема телеметрической информации (ТМИ) от одного источника относительно друг друга и относительно номинальных уровней (см., например, средние значения медиан позиций четырехпозиционного сигнала бортовой калибровки $U_{\text{мед}_i\text{_cp}}$, где i — номер позиции, полученные экспериментальным путем и представленные в табл. 4 в двоичных единицах). Поэтому в настоящее время в ВЦ космодрома при обработке ТМИ с использованием аналоговых реализаций аналогового сигнала выполняется повторная нормализация.

Таблица 4. Экспериментальные данные, характеризующие качество нормализации, осуществляемое в ПРС

ПРС	$U_{\text{мед}_1\text{_cp}}$	$U_{\text{мед}_2\text{_cp}}$	$U_{\text{мед}_3\text{_cp}}$	$U_{\text{мед}_4\text{_cp}}$
МК-12а	31	98	166	235
МК-16б	30	92	155	220
Номинальные уровни	32	96	160	224

Результаты исследований [5], выполненных в ВЦ космодрома, показали, что лучше возможности нормализации обеспечиваются при использовании четырехпозиционного синусоидального сигнала бортовой калибровки БИТС типа БРС-4 «Скут-40», особенностью которого является априори известная фаза (рис. 3). Чтобы привести сигналы к номинальным уровням (см. рис. 2), необходимо осуществить преобразования

$$u_{\text{норм}} = au + b, \quad (1)$$

где $u_{\text{норм}}(u)$ — значение нормализованного (ненормализованного) телеизмерения;

a, b — коэффициенты.

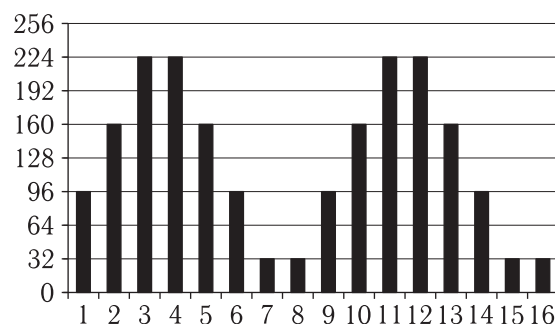


Рис. 3. Эпюра четырехпозиционного синусоидального сигнала бортовой калибровки

Коэффициенты a и b (1) получим путем решения системы двух уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{ном_max}} = aU_{\text{мед}_4} + b, \\ U_{\text{ном_min}} = aU_{\text{мед}_1} + b. \end{cases} \quad (2)$$

Из (2) следует, что

$$\begin{aligned} a &= \frac{U_{\text{ном_max}} - U_{\text{ном_min}}}{U_{\text{мед}_4} - U_{\text{мед}_1}} = \\ &= \frac{224 - 32}{U_{\text{мед}_4} - U_{\text{мед}_1}} = \frac{192}{U_{\text{мед}_4} - U_{\text{мед}_1}}, \quad (3) \\ b &= U_{\text{ном_max}} - aU_{\text{мед}_4} = 224 - aU_{\text{мед}_4}. \end{aligned}$$

Медианы позиций сигнала бортовой калибровки (а не средние значения их уровней) позволяют избежать смещения оценок значений первой и четвертой позиций при выходе принятого сигнала за границы шкалы телеметрического канала (см. рис. 2).

Установлены [5] требования $\Delta u_{\text{доп}}$ к допустимым помехам:

$$|U_{\text{ном}_i} - U_{\text{мед}_i}| < \Delta u_{\text{доп}}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

где $U_{\text{ном}_i}$ — номинальное значение уровня i -й позиции четырехпозиционного сигнала.

В процессе осуществления нормализации вычисляют и постоянно корректируют значения коэффициентов a и b для каждого блока данных на временных интервалах относительно устойчивого приема ТМИ (при выполнении условия (4)).

Если же условие (4) не выполняется (т. е. в каналах разнесения действуют относительно сильные помехи), то используют предварительно вычисленные и запомненные значения коэффициентов a и b .

Видим (см. рис. 2), что в нормализованном виде

$$\begin{aligned} U_{\text{норм_мед_1}} &= U_{\text{ном_min}} = 32, \\ U_{\text{норм_мед_4}} &= U_{\text{ном_max}} = 224, \end{aligned} \quad (5)$$

где $U_{\text{норм_мед_1}}$ ($U_{\text{норм_мед_4}}$) — нормализованное значение медианы первой (четвертой) позиции четырехпозиционного сигнала бортовой калибровки.

Для примера отметим, что для ТМИ ПРС МК-12а и МК-16б (см. табл. 4) конкретизированная формула (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} u_{\text{норм_МК-12}} &= 0,9412 \cdot u + 2,824, \\ u_{\text{норм_МК-16}} &= 1,0105 \cdot u + 1,690. \end{aligned}$$

Максимальное отклонение позиций от номинальных значений — $\Delta u_{\text{max_МК-12}} = 224 - 235 = -11$ (дв. ед.), что составляет примерно 5,7 % от номинальной шкалы контрольного сигнала; $\Delta u_{\text{max_МК-16}} = 160 - 155 = 5$ (дв. ед.) — примерно 2,6 % от номинальной шкалы контрольного сигнала (см. (4)). По сути, это характеристики систематической ошибки; их значения относительно малы, однако они способны в значительной мере ухудшить достоверность (см. табл. 5 и пояснения к ней).

Процесс нормализации очень важен и с точки зрения кодопреобразования «ЛС-УК», заключающегося в выделении двух смысловых разрядов из аналоговой реализации четырехпозиционного сигнала, представленной в структуре ЛС и С4 в виде восьмиразрядного двоичного слова [5].

В ВЦ космодрома проведены испытания способов установки порогов при выделении из аналоговых реализаций четырехпозиционного сигнала двухразрядного элементарного данного [5].

В частности, испытаны следующие способы установки порогов.

1. Автоматическая установка порогов в блоках порогового разделения (БПР) аппаратуры ввода цифровой (АВЦ) (штатный режим работы БПР АВЦ, обычно применяемый в ВЦ) с обучением устройств БПР по четырехпозиционному сигналу

бортовой калибровки (см. рис. 3). (Наименование аппаратуры «АВЦ» присвоено ее разработчиком — АО «НПО ИТ».)

2. Выбор двух старших разрядов из восьмиразрядных слов, соответствующих аналоговым реализациям четырехпозиционного сигнала (способ, реализованный с помощью некоторых применяемых компьютерных программ, обеспечивающих преобразования ТМИ структуры типа С4 или ЛС в структуру типа УК).

3. Автоматическая установка на период длительности блока данных уровней порогов, равных полусуммам медиан соседних позиций четырехпозиционного сигнала бортовой калибровки. Например, для определения значения первого порога по тестовому четырехпозиционному сигналу бортовой калибровки вычисляются медианы для первой и второй позиций, суммируются и делятся на 2. Способ предложен для работы с ТМИ БРТС «Скут-40», содержащей четырехпозиционный, априори известный сигнал бортовой калибровки (см. рис. 3).

В качестве базового выбран первый способ. При проведении испытаний использована реальная ТМИ. Полученные результаты с использованием балльных оценок E [1, 2] представлены в табл. 5 ($E = -1$ означает, что испытуемый способ обеспечивает *существенно* [1, 2] меньшую достоверность, чем базовый; $E = 0$ — примерно такую же; $E = 1$ — *существенно* бо́льшую достоверность).

Таблица 5. Результаты испытания способов установки порогов при осуществлении кодопреобразования «С4-УК»

№ способа	Число блоков данных, %, $E =$		
	-1	0	1
2	2	32	66
3	0	8	92

Наибольшую достоверность обеспечивает третий способ, причем его преимущество — подавляющее (см. табл. 5). Из сущностей второго и третьего способов следует, что при высококачественной нормализации принятых четырехпозиционных сигналов и последующем выборе двух старших разрядов

из восьмиразрядных слов ТМИ структуры типа С4 или ЛС (как это делается при применении второго способа) получим эффект, аналогичный применению третьего способа. То есть в этом случае обеспечивается такая же относительно высокая достоверность, как и в случае применения третьего способа. Здесь нормализация равносильна устранению систематических ошибок, вызванных помехами (их математическое ожидание больше нуля), а результаты эксперимента показывают, что даже при относительно малых систематических ошибках, вызывающих отклонения позиций принятого четырехпозиционного сигнала от их номинальных значений, достоверность *существенно* [1,2] ухудшается.

Заключение

Таким образом, существуют хорошие возможности повышения достоверности комплексированием методов разнесенного приема и помехоустойчивого кодирования (декодирования) в случаях, когда декодирование ориентировано на мягкое решение при демодуляции. При этом модернизация разработанных алгоритмов получения обобщенных данных A_4 и A_{42} , необходимая для создания условий для вышеупомянутого декодирования, не требует больших усилий. Однако для ее успешного осуществления актуальны меры по нормализации принятых сигналов (по приведению уровней принятых m -позиционных сигналов к их номинальным значениям). От качества нормализации зависит достоверность, обеспечиваемая алгоритмами A_4 и A_{42} , а также точность оценок надежности принятых символов (надежности аналоговых

реализаций принятых m -позиционных сигналов), необходимых для декодирования с мягким решением.

Список литературы

1. Воронцов В.Л. Методы разнесенного приема телеметрической информации и условия их применения в процессе развития телеметрического комплекса космодрома. 2-е изд., перераб. и доп. Набережные Челны: Изд-во Кам. гос. инж.-экон. акад., 2009. 284 с.
2. Correlated Data Generation, Research and Development for Space Data System Standards CCSDS 551.1-O-1, Issue 1, Orange Book, Consultative Committee for Space Data Systems, July 2015. <https://public.ccsds.org/Publications/NonEnglishVersions.aspx> (Дата обращения: 25.12.2017).
3. Воронцов В.Л. Улучшение достоверности данных путем использования возможностей разнесенного приема // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 61–70.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
5. Воронцов В.Л. О контроле верности телеизмерений быстроменяющихся параметров при летных испытаниях ракетно-космической техники // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2004, № 3. С. 49–55.
6. Воронцов В.Л. Об устранении несимметричности каналов разнесения при выделении данных из аналоговых реализаций четырехпозиционных сигналов // Исследование и моделирование ракетно-космических комплексов и их элементов. М.: Изд-во МАИ, 2004. С. 26–31.