

Улучшение достоверности путем использования возможностей разнесенного приема данных

В. Л. Воронцов

к.т.н., филиал ОАО «ОПКС»–«НИИКП»

e-mail: a762642@yandex.ru

Аннотация. Представлен анализ возможностей улучшения достоверности данных путем комплексирования методов помехоустойчивого кодирования (декодирования), прежде всего рекомендуемых CCSDS, и методов разнесенного приема, прежде всего описанных в Оранжевой Книге CCSDS 551.1-O-1 «Correlated Data Generation». Конкретизирован подход к комплексированию, описанный, в частности, в вышеупомянутой Оранжевой Книге. На наглядных примерах и простых расчетах показано существенное улучшение достоверности. При этом обоснована важность правильного выбора способа комплексирования, в противном случае создается угроза ухудшения достоверности (необходимое условие правильного выбора — соответствие способа условиям помеховой обстановки). Предложено более полное использование методов разнесенного приема (как явно недооцененных CCSDS-сообществом).

Ключевые слова: алгоритм, аналоговая реализация цифрового сигнала, канал разнесения, комплексирование, методы помехоустойчивого кодирования, методы разнесенного приема, обобщенные данные, радиолиния, символ, условия помеховой обстановки

Reliability Improvement Through Making the Most Use of Data Diverse Reception Capabilities

V. L. Vorontsov

candidate of engineering science,

A branch of JSC “United Rocket and Space Corporation”–“Institute of Space Device Engineering”

e-mail: a762642@yandex.ru

Abstract. Analysis is made available of capabilities for improving data reliability by integrating the noiseless coding techniques (decoding) that, above all, is recommended by CCSDS, and the diversity reception techniques described in the Orange Book CCSDS 551.1-O-1 «Correlated Data Generation». The integration approach described in the aforesaid Orange Book is detailed. Demonstrative examples and simple calculations are cited to illustrate that data reliability is substantially improved. Herewith, the reasons are given for selecting the optimal integration method, otherwise, it could result in the degradation of reliability (the necessary condition for making the adequate choice — the technique conformity to the interference situation). It is proposed to make better use of the diversity reception techniques (obviously underappreciated by the CCSDS community).

Keywords: algorithm, analog implementation of digital signal, diversity channel, integration, noiseless coding techniques, diversity reception techniques, correlated data, radio link, symbol, interference situation conditions

При построении радиолинии (радиоканала) важно обеспечить требуемую достоверность принятых данных. Весьма полно, комплексно и практически значимо пути обеспечения требуемой достоверности (методы, алгоритмы и т. д., далее — технологии) описаны в имеющих силу документах CCSDS, относящихся к направлению (области) SLS (см., в частности, [1–3 и др.]. CCSDS — Consultative Committee for Space Data Systems — Консультативный комитет по космическим системам передачи данных; SLS — Space Link Services — Средства космических радиолиний). Однако в них отсутствуют описания технологий, связанных с разнесенным приемом. Исключение — Оранжевая Книга CCSDS 551.1-O-1 «Correlated Data Generation» [4] (она является вкладом Роскосмоса для CCSDS). Описанная в ней технология базируется на научных результатах, представленных в монографии [5], адаптированных к требованиям CCSDS. Технология относится исключительно к разнесенному приему данных и в то же время содержит подходы к комплексированию методов модуляции, помехоустойчивого кодирования и разнесенного приема [4]. Представленные [4] результаты можно условно разделить на три группы:

- предложенные методы и алгоритмы для повышения достоверности данных, поступивших из каналов связи (прежде всего алгоритмы A_4 и A_{42} , адаптирующиеся к изменяющимся во времени условиям помеховой обстановки);
- подходы к комплексированию предложенных (вышеупомянутых) методов и алгоритмов и методов и алгоритмов повышения достоверности данных, рекомендуемых CCSDS;
- предложенные модели, критерии и методики для выбора рациональных стратегий повышения достоверности данных.

Обосновано [4], что возможности традиционных для CCSDS-сообщества технологий повышения достоверности данных существенно возрастут при применении технологий, связанных с разнесенным приемом данных. Тем не менее, предложенная [4] технология весьма обособлена по отношению к традиционным технологиям повышения достоверности, рекомендуемым CCSDS. Следствие

такого обособления (следствие отсутствия соответствующего комплексирования) — неиспользование CCSDS-сообществом дополнительных (и существенных) возможностей повышения достоверности данных, связанных с разнесенным приемом.

Судя по публикациям, пик развития теории разнесенного приема отечественными учеными приходится на 60-е–70-е годы XX века (см. [6–8 и др.]). Просматривается стремление максимально использовать возможности разнесенного приема, причем без акцентов на его приоритетность — наблюдается ярко выраженный комплексный подход к использованию различных методов повышения (обеспечения требуемой) достоверности данных («...нельзя, как это делают некоторые авторы, противопоставлять системы с повторением систем с корректирующим кодом» [8]).

В сегодняшних условиях также актуален системный (комплексный) подход к развитию технологий повышения достоверности данных, базирующийся на вышеупомянутых научных результатах отечественных ученых, на соответствующих традиционных технологиях CCSDS [1–3 и др.] и на технологии, описанной в Оранжевой Книге CCSDS 551.1-O-1 [4]. Назрела необходимость наиболее полного использования возможностей разнесенного приема, которые оказались в настоящее время невостребованными. В этой связи целесообразно подробнее рассмотреть комплексирование методов помехоустойчивого кодирования (широко применяемых CCSDS-сообществом) и разнесенного приема.

Цель настоящей работы заключается в поиске возможностей повышения достоверности данных комплексированием технологий, базирующихся на традиционных для CCSDS-сообщества методах помехоустойчивого кодирования (декодирования) и технологии, описанной в Оранжевой Книге CCSDS 551.1-O-1 «Correlated Data Generation», связанной с разнесенным приемом и касающейся получения обобщенных данных.

Суть получения обобщенных данных пояснена на рис. 1 [4].

Каналы разнесения — физические каналы для передачи потока битов одного источника данных [4]. Блок данных — конечное множество (набор) данных, имеющих определенную структуру (фрейм передачи [9], фрейм передачи с прикреп-

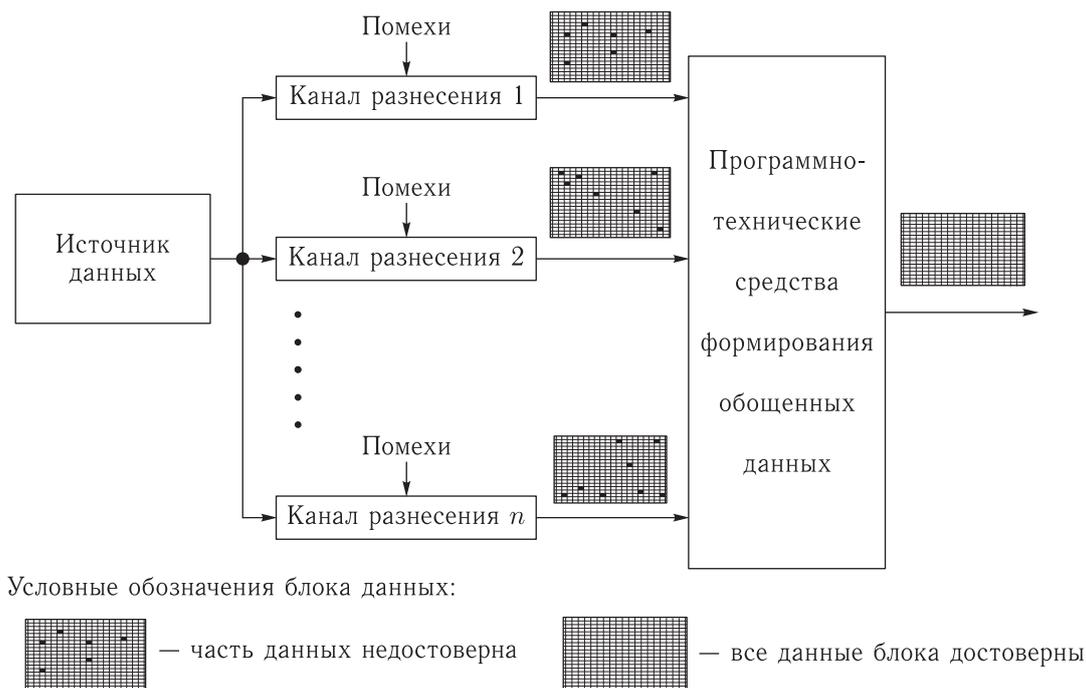


Рис. 1. Иллюстрация процесса формирования обобщенных данных

ленным синхромаркером и корректирующими битами кода Рида–Соломона [9] и т. д. — конкретизированные блоки данных) [4]. Обобщенные данные — данные, полученные методами разнесенного приема [4].

Каждому переданному блоку данных соответствует n блоков, поступивших из каналов разнесения.

В практике для получения обобщенных данных широко применяются автовыбор и мажорирование.

При автовыборе в массив обобщенных данных автоматически выбираются данные одного канала разнесения, для которого коэффициент усиления равен 1, а для остальных — 0. Особенность одной из модификаций автовыбора заключается в том, что выбор в массив обобщенных данных осуществляется поблочно. Его основное ограничение состоит в исключении возможности взаимодополнения данных блоков, поступивших из каналов разнесения, соответствующих одному и тому же переданному блоку и в разной мере искаженных помехами.

При мажорировании решение о выборе данного в массив обобщенных данных принимается голосованием, коэффициент усиления для каждого

канала разнесения равен $1/n$ (где n — количество каналов разнесения). Если, например, $\{0, 1\}$ — алфавит данных, $n = 5$, значения данных трех каналов разнесения равны 0, а остальных двух — 1, то считается переданным (выбирается в массив обобщенных данных) данное, значение которого равно 0. Его ограничением является низкая помехоустойчивость при искажении помехами данных значительного числа каналов разнесения.

Из поступивших по каналам разнесения блоков данных в блок обобщенных выбирают наиболее достоверные данные, выделенные из аналоговой реализации, или символа цифрового сигнала (это — элементарные данные). Их размер может составлять, в частности, 1 бит или 2 бита (например, при применении соответственно двух- или четырехпозиционного сигнала). Разработанные алгоритмы получения обобщенных данных A_4 и A_{42} обеспечивают большую достоверность, чем автовыбор и мажорирование [4, 5]. Если в каждом исходном (поступившем из канала разнесения) m -битовом слове ($m \gg 1$) некоторые элементарные данные недостоверны, то есть основание ожидать, что в сформированном слове недостоверных обобщенных элементарных данных не окажется.

Разнесение данных (сигналов) осуществляется следующими способами:

- по частоте (разные несущие частоты; например, метрового и дециметрового диапазонов);
- по поляризации (например, сигналы вертикальной и горизонтальной поляризации);
- в пространстве (на разные антенны, размещенные на удалении друг от друга);
- во времени (с использованием бортовых запоминающих устройств).

Рассмотрим (по аналогии с энергетическим выигрышем от кодирования g_K) энергетический выигрыш g_{RP} от разнесенного приема (ЭВРП).

Энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК) g_K определяется как разность отношений сигнал/шум на входе приемника при некодированной $h_{0нк}^2$, дБ передаче и при кодированной $h_{0к}^2$, дБ передаче, которые обеспечивают одинаковое значение вероятности ошибки $P_{ош}$ на информационный символ [10, 11]:

$$g_K = h_{0нк}^2 - h_{0к}^2 \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $h_0^2 = \frac{E_b}{N_0}$ — отношение сигнал/шум.

При вычислении ЭВРП осуществляемое сравнение отношений сигнал/шум касается одного канала разнесения и всех каналов.

Обосновано [8], что в случае оптимального когерентного сложения и идентичности всех каналов разнесения (осуществляется прием на разнесенные антенны) соотношение сигнала к помехе увеличивается в n раз:

$$h_{\Sigma \text{ раз}}^2 = n h_{0 \text{ раз}}^2, \quad (2)$$

где $h_{0 \text{ раз}}^2$ ($h_{\Sigma \text{ раз}}^2$) — отношение сигнал/шум в одном канале разнесения (в результате осуществления разнесенного приема),

n — количество каналов разнесения.

Нижний индекс «раз» обозначает, что отношение сигнал/шум измерено в разгах. Если его представить в децибелах (как это сделано в (1)), то выражение (2) приобретет следующий вид:

$$h_{\Sigma}^2 = h_0^2 + 10 \lg n \text{ дБ}. \quad (3)$$

Тогда ЭВРП (аналогично (1)) будет равен

$$g_{RP} = 10 \lg n \text{ дБ}. \quad (4)$$

В табл. 1 представлены результаты (4), иллюстрирующие ЭВРП g_{RP} в зависимости от количества каналов разнесения n .

Таблица 1. Результаты, иллюстрирующие возможности повышения ЭВРП

n	2	3	4	5
g_{RP} , дБ	3,0	4,8	6,0	7,0

Для сравнения заметим, что, например [11], в случае применения сверточного кода с кодовой скоростью $R_{код} = 1/2$ ($R_{код} = k/n$, где k — количество информационных символов в кодовой комбинации длиной n), при осуществлении двоичной фазовой модуляции и декодирования по алгоритму Витерби обеспечивается ЭВК порядка 5,1 дБ при битовой ошибке 10^{-5} .

Из полученных результатов краткого анализа, касающихся ЭВРП, следует:

- существуют значительные возможности улучшения энергетических характеристик радиолиний применением методов разнесенного приема;
- методы разнесенного приема и помехоустойчивого кодирования в принципе не являются альтернативными (обычно нет явных препятствий для их комплексирования).

Отмечено [8], что повторение k информационных битов d раз равносильно осуществлению систематического циклического корректирующего кода с $n = dk$ и хэмминговым расстоянием d (где n — длина кодовой комбинации). В данном случае исправление ошибок осуществляется мажорированием (дискретное сложение — в терминах [8]), что в симметричном постоянном канале соответствует критерию максимального правдоподобия. Обнаруживают ошибки, если их число не превышает $d - 1$, или исправляют ошибки, если их кратность (при нечетном d) не больше $\frac{1}{2}(d - 1)$.

Показано [8], если повторять несколько раз комбинации избыточного кода с минимальным хэмминговым расстоянием d_1 , то получится код с $d_{\min} = d_1 d_2$, где d_2 — число повторений. Видим, что $d_{\min} = 15$ при $d_2 = 5$ и $d_1 = 3$. Такое комплексирование позволяет обнаруживать 14 или исправлять 7 ошибок, при том, что без разнесения

каналов соотношение обнаруживаемых и исправляемых ошибок составляет 2 и 1.

Заметим, что в приведенном примере ошибочные данные независимы и для каждого канала разнесения их вероятности одинаковы.

Если же данные, поступающие из значительной части каналов разнесения, искажены помехами (недостовверны), то результатом комплексирования разнесенного приема данных и помехоустойчивого кодирования (декодирования) может стать существенное ухудшение достоверности выходных данных.

Поясним это утверждение примером комплексирования мажорирования и мажоритарного декодирования.

Для этого рассмотрен (см. пример из § 5.3 [10]) систематический код (7, 3) со следующими порождающей G и проверочной H матрицами ($G \cdot H^T = 0$, где индекс «Т» обозначает транспонирование):

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Кодирование осуществляется по следующему правилу:

$$\mathbf{b} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{G},$$

где $\mathbf{a} = |a_1, a_2, \dots, a_k|$ — матрица-строка слова на входе кодера;

$\mathbf{b} = |b_1, b_2, \dots, b_n|$ — матрица-строка кодового слова на выходе кодера;

\mathbf{G} — порождающая матрица (n, k) кода.

Следовательно, $\mathbf{a} = |a_1, a_2, a_3|$, $\mathbf{b} = |b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7|$ и справедливы следующие равенства, учитываемые при осуществлении соответствующего кодирования:

$$b_1 = a_1, \quad b_2 = a_2, \quad b_3 = a_3,$$

$$b_4 = a_1 \oplus a_3, \quad b_5 = a_1 \oplus a_2 \oplus a_3,$$

$$b_6 = a_1 \oplus a_2, \quad b_7 = a_2 \oplus a_3.$$

Проверочные соотношения таковы:

$$b_1 \oplus b_3 \oplus b_4 = 0, \quad b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_5 = 0,$$

$$b_1 \oplus b_2 \oplus b_6 = 0, \quad b_2 \oplus b_3 \oplus b_7 = 0.$$

Построенные с их использованием оценки (для краткости ниже представлены оценки только для b_1) имеют следующий вид:

$$b_1 = b_1, \quad b_1 = b_3 \oplus b_4, \quad b_1 = b_5 \oplus b_7, \quad b_1 = b_2 \oplus b_6.$$

Решение о каждом принятом информационном символе принимается «большинством голосов», или мажорированием. Пусть получены следующие оценки (см. § 5.3 [10]):

$$b_1 = b_1 = 1, \quad b_1 = b_3 \oplus b_4 = 1,$$

$$b_1 = b_5 \oplus b_7 = 1, \quad b_1 = b_2 \oplus b_6 = 0.$$

Так как количество оценок «1» превышает количество оценок «0», то принимается решение $b_1 = 1$.

В случае вышеупомянутого комплексирования возможны разные способы получения оценок b_1 , b_2 и b_3 (способы «голосований» для получения оценок b_1 , b_2 и b_3), количество «голосований» существенно возрастет. Например, формульное выражение для получения оценок $b_1 = b_3 \oplus b_4$ одним способом трансформируется следующим образом: $b_{1i} = b_{3i} \oplus b_{4i}$; для других способов — $b_{1i} = b_{3j} \oplus b_{4k}$; $i, j, k = 1, 2, \dots, n$; $i \neq j$, $i \neq k$, $j \neq k$; где i, j, k — условные номера (обозначения) каналов разнесения, к которым относятся соответствующие b_1 , b_3 и b_4 ; n — количество каналов разнесения.

Из приведенного примера следует, что, независимо от способов получения оценок b_1 , b_2 и b_3 (и аналогичных им), если вероятности ошибочных данных, поступающих из каналов разнесения, относительно малы и примерно одинаковы, а ошибки независимы, то рассмотренное комплексирование целесообразно (достоверность выходных данных существенно улучшится). Если же данные всех каналов разнесения, за исключением одного, полностью поражены помехами (т.е. недостоверны), а в оставшемся одном — достоверны, то вышеупомянутое комплексирование приведет к полной потере информации.

Видим, что существует реальная угроза усиления эффекта размножения ошибок в мажоритарных декодерах [11] при неудачном комплексировании методов разнесенного приема данных и помехоустойчивого кодирования (декодирования). Из рассмотренного примера следует, что причиной неудачного комплексирования может быть

несоответствие ожидаемых условий помеховой обстановки, для которых предназначена выбранная технология обеспечения требуемой достоверности данных, реальным условиям. Впрочем, это замечание справедливо и по отношению к другим технологиям повышения (обеспечения требуемой) помехоустойчивости.

Заметим, что в рекомендациях CCSDS (см., в частности, [1–3 и др.]) для оценивания помехоустойчивости обычно рассматривают каналы связи, в которых действуют помехи в виде аддитивного белого гауссова шума (АБГШ). Преимущество такого подхода — в определенности (недвусмысленности) получаемых оценок, в наличии хорошо отработанного необходимого методического и программного обеспечения.

Однако в практике весьма часто ошибки группируются в пакеты ошибок. Результаты применения одних и тех же методов в условиях АБГШ и в условиях сильно зависимых ошибок (в условиях группирования ошибок) существенно отличаются. Предложен [12], в частности, научно-методический аппарат для описания таких условий помеховой обстановки. В работах отечественных ученых в 60-е–70-е годы XX века (см. [6–8 и др.]), касающихся помехоустойчивости, значительное внимание уделено описанию разнообразных условий помеховой обстановки, результатам применения разных методов повышения помехоустойчивости в этих условиях. В частности, при рассмотрении методов разносенного приема значительное внимание уделено вычислению оптимальных коэффициентов усиления аналоговых реализаций аналоговых и (чаще) цифровых сигналов каждого канала разносения (каждой ветви — в терминах [8]), причем для разнообразных условий помеховой обстановки.

Стремление к более полному учету особенностей помеховой обстановки наблюдается и при анализе технологий CCSDS. Считают [11], что предварительное применение мягкого модема (в определенной мере учитывающего особенности действующих в канале связи помех) обеспечивает выигрыш на 2 дБ по сравнению с жестким модемом, при последующем декодировании сверточных кодов по алгоритму Витерби.

Особенностью предложенной [4] технологии является формирование обобщенных данных

с применением лишь данных, поступивших из каналов разносения (оценки надежности принятых символов, аналогичные формируемым мягким модемом, не используют). При этом обосновано [4, 5], что при комплексировании методов разносенного приема данных и помехоустойчивого кодирования (декодирования) необходимо для обеспечения наибольшей достоверности осуществлять сначала получение обобщенных данных, а затем декодирование.

Видим, что в существующем виде предложенная [4] технология подходит для работы с данными, сформированными с применением жесткого модема, а в случае мягкого модема оценки надежности принятых символов будут проигнорированы, и из-за этого последующее декодирование, ориентированное на мягкое решение при демодуляции, окажется неполноценным (в частности, декодирование по алгоритму Витерби, традиционное для CCSDS-сообщества).

В этой связи кратко (и ниже) рассмотрены вопросы более полного учета особенностей условий помеховой обстановки при осуществлении методов разносенного приема (более подробно эти возможности рассмотрены в [5]). Они касаются обеспечения требуемой полноты информации о характере действия помех на сигналы, поступившие из каналов разносения.

Существуют методы, игнорирующие информацию о законе распределения помех при осуществлении разносенного приема. К ним относятся методы наименьших квадратов, наименьших модулей и т. д. (критерием для них служит минимум нормы вектора невязок), обеспечивающие преимущества, связанные с простотой реализации, но не всегда эффективные из-за неполной информации о характере действия помех. Суммарный сигнал может быть представлен

$$z_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i z_i(t), \quad (5)$$

где β_i — коэффициент усиления сигнала i -го канала разносения,

$$z_i(t) = w_i y(t) + x_i(t), \quad (6)$$

где $y(t)$ — передаваемый сигнал;

w_i — коэффициент, зависящий от условий распространения сигнала в i -м канале разносения;

$x_i(t)$ — помеха в i -м канале разносения.

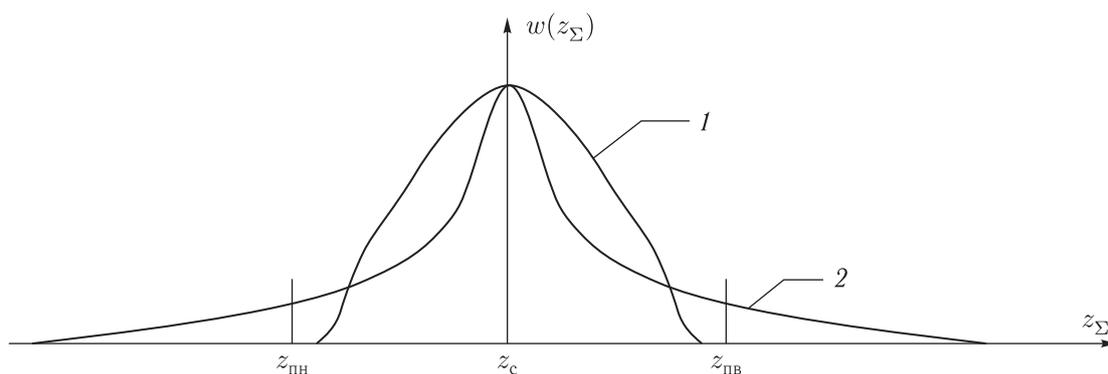


Рис. 2. Графики распределения плотности вероятности помех в суммарном сигнале

Коэффициенты β определяют по формуле:

$$\beta_{xi} = \frac{w_i}{D_{xi}}, \quad (7)$$

где D_{xi} — дисперсия помехи в i -м канале разнесения.

Однако в ряде работ отмечается необъективность такого подхода к оценке помех (см. критические замечания по работам Бреннана и др. [6, 8]). В правомерности этих замечаний можно убедиться на простом примере. Пусть вычислены две группы коэффициентов β (7) для получения суммарных цифровых сигналов $z_{\Sigma}(t)$ (5), при применении которых имеют место два варианта распределения реализаций суммарного сигнала: $w_1(z_{\Sigma})$ и $w_2(z_{\Sigma})$ (рис. 2). Положим также, что дисперсия помех на выходе первой системы разнесенного приема больше, чем на выходе второй системы: $D_{x\Sigma 1} > D_{x\Sigma 2}$. С точки зрения анализируемого метода предпочтительнее второй вариант. Но выбор именно второго варианта приводит к ошибкам при выделении из суммарного сигнала содержащихся в нем данных, возникающих из-за выхода суммарного сигнала за границы нижнего и верхнего порогов, $z_{пн}$ и $z_{пв}$ (см. рис. 2).

Из приведенного примера следует, что упрощенный подход к назначению параметров для описания помеховой обстановки не обеспечивает хорошее качество суммарного сигнала $z_{\Sigma}(t)$. Однако если априори известно, что в каналах разнесения действуют независимые помехи, плотность распределения которых подчиняется нормальному закону, то при вычисленных по формуле (7) коэффициен-

тах искажения суммарного сигнала $z_{\Sigma}(t)$ (5) минимальные.

Показано [5], что проблема определения рационального состава параметров для описания помеховой обстановки особенно сильно проявляется в случае зависимости помех, действующих в каналах разнесения. Отсутствие такой зависимости позволяет уменьшить число параметров, не нанося ущерба качеству оценки помех. В то же время введение чрезмерного числа параметров не только существенно усложнит вычисления, но и может привести к обратному эффекту: ухудшению качества оценки при нестационарном характере действия помех. Чаще всего для учета зависимости помех из-за невозможности принять во внимание все варианты их действия какие-то приходится игнорировать — несущественные, по мнению разработчика системы разнесенного приема (в той или иной мере обоснованному).

Показано [5], что и после выделения данных из аналоговых реализаций цифровых сигналов информация о помеховой обстановке теряется не полностью, возможность ее восстановления повышается с увеличением объема обучающей выборки. Существуют предпосылки создания весьма эффективных алгоритмов получения обобщенных данных (а не суммарных аналоговых реализаций сигналов) [5]. Такими алгоритмами, в частности, являются A_4 и A_{42} [4, 5]. При этом наиболее полное использование информации о помеховой обстановке актуально.

С целью дополнительного улучшения достоверности данных путем более полного использования информации о помеховой обстановке рассмот-

рены возможности получения обобщенных данных (с использованием алгоритмов типа A_4 и A_{42}) и последующего декодирования, ориентированного на мягкое решение при демодуляции (в частности, декодирования по алгоритму Витерби).

Чтобы обеспечить необходимые условия такого комплексирования, алгоритмы A_4 и A_{42} (в случае их использования) необходимо модифицировать. Модификация касается сущностей выходного данного мягкого модема, которое является входным для декодера при традиционном мягком декодировании и для программно-технических средств формирования обобщенных данных (см. рис. 1) в случае предлагаемого комплексирования. Это данное может быть интерпретировано следующим образом: его старшие биты (разряды) относятся к информационному данному, выделенному из определенного принятого символа, или аналоговой реализации цифрового сигнала (относятся к элементарному данному — в терминах [4]), а младшие биты (разряды) — к оценке надежности этого символа (этой аналоговой реализации цифрового сигнала или этого элементарного данного). Если, например, элементарное данное однобитовое, а выходное данное восьмиуровневого мягкого модема трехбитовое (см. рис. 7.8 и пояснения к нему [13]), то (следуя предложенной логике) на оценку надежности этого элементарного данного приходится два бита (табл. 2).

Таблица 2. 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	

В табл. 2 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 (не обязательно они должны быть такими же при схемной реализации соответствующих программно-технических средств). Они 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) [13].

Последующее формирование обобщенных данных нужно осуществлять по алгоритму A_4 (A_{42}), причем, как обычно, с использованием лишь элементарных данных, поступивших из каналов разнесения [4, 5]. 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. 3).

Таблица 3. 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
...

Логика такого подхода к выбору наиболее подходящей оценки надежности, относящейся к данному $e_{об}$, следует из сущностей алгоритмов A_4 и A_{42} . Она заключается в том, что в результате применения алгоритма A_4 (A_{42}) достоверность обобщенных данных повышается по сравнению с данными, поступающими из каждого отдельного канала разнесения, и, следовательно, к каждому из элементарных обобщенных данных должна относиться лучшая оценка надежности, по сравнению с соответствующими оценками, касающимися

отдельных каналов разнесения (типа рассмотренных выше каналов i_1, \dots, i_h). Справедливо утверждать, что чаще всего вероятность идентификации ненадежного элементарного обобщенного данного (типа $e_{об}$) ниже, чем элементарного данного, поступающего из отдельного канала разнесения.

Заметим, для осуществления рассмотренного выше комплексирования необходимо формирование определенной структуры регистрируемых данных, поступивших из каналов разнесения. Эти данные должны содержать информацию об оценках надежности символов (элементарных данных). При этом объем данных, поступивших из отдельного канала разнесения с оценками надежности символов, существенно больше объема традиционно сформированных данных. Например, в случае однобитового элементарного данного и трехбитового данного с выхода восьмиуровневого мягкого модема (см. выше) объем данных увеличится примерно в 3 раза (в частности, вместо потока 1 Мбит/с получаем 3 Мбит/с).

Это увеличение объема данных (скорости поступления данных из отдельного канала разнесения) нужно учитывать прежде всего в случае разнесения данных (сигналов) в пространстве при обосновании выбора стратегии доставки (сбора) данных в единый пункт формирования массива обобщенных данных (напомним, что для обеспечения наибольшей достоверности декодирование осуществляют после получения обобщенных данных [4, 5]).

Из полученных результатов следует, что предложен удачный способ комплексирования методов разнесенного приема и помехоустойчивого кодирования (декодирования), конкретизирующий рассмотренный ранее [4, 5] подход к комплексированию, причем с уместной для существующих условий детализацией. Дальнейшее развитие способа связано с конкретизацией используемых структур данных, алгоритмов получения обобщенных данных и кодирования (декодирования), а также схемных решений. Оно прежде всего касается модифицированных алгоритмов A_4 и A_{42} , сверточного кодирования и декодирования по алгоритму Витерби.

Актуально также развитие технологии [4] комплексированием методов разнесенного приема и помехоустойчивого кодирования (декодирования),

связанное с использованием обобщенных данных типа $e_{об_оц}$ (см. табл. 3), полученных с применением модифицированных алгоритмов A_4 и A_{42} , и с последующей идентификацией ненадежных символов (элементарных данных) при декодировании.

Наиболее простым примером использования информации о надежности принятых символов является метод Вагнера [8]. Суть метода заключается в том, что при наличии ошибок в принятой последовательности регенерированных символов (в принятой последовательности элементарных данных — в терминах [4, 5]) значение наименее надежного символа изменяется на противоположное и, если он действительно был ошибочным, количество ошибок уменьшается. Аналог метода Вагнера — метод Бородина (метод Бородина применим к кодам с любым основанием, а метод Вагнера рассчитан только на двоичные коды) [8].

Примеры с методами Вагнера и Бородина представлены без детализации сущностей самих методов и их комплексирования — лишь для обозначения направления возможных (и перспективных) работ по вышеупомянутому комплексированию.

Таким образом, имеются значительные резервы повышения достоверности данных, связанные с комплексированием методов помехоустойчивого кодирования (декодирования), рекомендуемых CCSDS, и методов разнесенного приема, причем с более полным использованием методов разнесенного приема (как явно недооцененных CCSDS-сообществом). При этом актуальная (с точки зрения вышеупомянутого комплексирования) технология, базирующаяся на разнесенном приеме, описана в Оранжевой Книжке CCSDS 551.1-O-1 «Correlated Data Generation».

Список литературы

1. Radio Frequency and Modulation Systems. Part 1: Earth Stations and Spacecraft, Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 401.0-B-23, issue 23, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems. December 2013.
2. TM Synchronization and Channel Coding, Recommended Standard CCSDS 131.0-B-2, Issue 2, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems. August 2011.

3. Bandwidth-Efficient Modulations: Summary of Definition, Implementation, and Performance, Informational Report CCSDS 413.0-G-2, issue 2, Green Book, Consultative Committee for Space Data Systems. October 2009.
4. 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.
5. *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.
6. *Андронов И.С., Финк Л.М.* Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. М.: Сов. радио, 1971. 408 с.
7. *Бородин Л.Ф.* Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. М.: Сов. радио, 1968. 408 с.
8. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.
9. TM Space Data Link Protocol, Recommended Standard CCSDS 132.0-B-1, issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems. September 2003.
10. *Банкет В.Л.* Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах: Учеб. пособие по изучению модуля 4 дисциплины ТЭС / В.Л. Банкет, П.В. Иващенко, Н.А. Ищенко. Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2011. 104 с.
11. *Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.* Многопороговые детекторы и оптимизационная теория кодирования / Под ред. академика РАН В.К. Левина. М.: Горячая линия — Телеком, 2013. 239 с.
12. *Турич В.Я.* Передача информации по каналам с памятью. М.: Связь, 1977. 248 с.
13. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. / Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.