УДК 681.518

© 2020 г. **И.В. Богачев,**

А.В. Левенец, д-р техн. наук,

Чье Ен Ун, д-р техн. наук

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

МЕТОД ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С АДАПТАЦИЕЙ К СОСТОЯНИЮ КАНАЛА СВЯЗИ*

Предложена система адаптивной помехозащищенной передачи телеметрических данных, основанная на оценке состояния канала связи. Рассмотрены наиболее распространенные способы оценки состояния канала связи. Полученные результаты позволяют определить приближенно-оптимальные параметры исследуемой системы.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, передача данных, канал связи, помехозащищенное кодирование.

DOI: 10.22250/isu.2020.64.126-135

Введение

Телеметрические системы нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1 – 4]. Основными критериями эффективности работы таких систем принято считать объем передаваемой в единицу времени информации и достоверность ее передачи, при этом определяющее влияние на них оказывает подсистема передачи данных, в частности подсистема помехозащищенного кодирования.

В настоящее время вопросам усовершенствования подсистем помехозащищенной передачи данных телеметрических систем уделяется пристальное внимание специалистов. Однако при этом основные принципы помехозащищенной передачи остаются неизменными фактически в течение послед-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0818-2020-0009).

них десятилетий. Это связано в первую очередь с тем, что существующий подход ориентирован, в основном, на повышение эффективной скорости передачи мультимедийной информации. Аппаратно-программные средства, реализованные в рамках такого подхода, как правило, имеют ограниченную возможность применения в телеметрических системах, в частности в силу значительно более высокого уровня требуемой достоверности, причем в условиях существенного изменения качества канала связи.

Таким образом, существует практическая необходимость разработки новых специализированных методов, способов и алгоритмов помехозащищенной передачи, в основе которых будет лежать принцип адаптации к состоянию канала связи, которую предлагается производить на основе вычисления характеризующей его оценки. При этом выбранный способ оценки будет напрямую влиять на эффективность использования канала связи. Действительно, на основе произведенной оценки могут быть выбраны оптимальные параметры помехозащищенного кода, объем передаваемых телеметрических данных и т.д.

Методы и способы оценки состояния канала связи

В общем случае все существующие методы оценки состояния канала связи условно можно разделить на следующие группы: параметрические, непараметрические и адаптивные.

Первая группа методов используется для каналов, удовлетворяющих некоторой заданной модели. Для них заранее известна статистическая связь между ошибками и результатами анализа сигнала. Данная группа представлена интервальным, пороговым, статистическим и другими методами, наиболее подробно исследованными для каналов с нормальным распределением вероятности ошибки [5].

В свою очередь методы, относящиеся ко второй группе, используются для случая, когда статистическая связь между ошибками и результатами анализа сигнала неизвестна, а модель канала может быть выбрана только на основе общих предположений. Данная группа представлена методом, основанным на использовании результатов декодирования кода, обнаруживающего ошибки [6, 7].

Отдельно можно выделить методы третьей группы, для которых в процессе определения качественного состояния канала связи дается оценка статистической связи между ошибкой и результатом анализа сигнала, а качество канала оценивается уже с учетом этой связи. Метод совместного анализа результатов декодирования и результатов анализа сигнала подробно рас-

смотрен в работе [7 – 13].

Важно отметить, что в дальнейшем будет говориться о способах оценки, основанных на непараметрическом методе. Такой выбор обуславливается как его универсальностью, так и отсутствием существенных временных задержек, затрачиваемых на вычисления. В качестве основных предлагаются следующие способы оценки: на основе непосредственной оценки состояния канала связи; на основе оценки результатов декодирования помехозащищенного кода и на основе вычисления синдрома БЧХ кода.

Первый способ основан на непосредственной оценке состояния канала связи и предполагает, что периодически по каналу связи будут передаваться данные с заранее известной структурой (эталонные данные), при этом их объем должен соответствовать пропускной способности канала. В таком случае оценка, выраженная числом искаженных бит, рассчитывается путем сравнения эталонных данных, прошедших через канал связи, с исходными (заведомо неискаженными).

В основе второго способа лежит оценка результата декодирования прошедшего через канал связи БЧХ кода, полученного для эталонных данных. В этом случае объем передаваемых данных равен числу кодируемых бит используемого кода, а оценка вырабатывается путем сравнения декодированных данных, прошедших через канал связи, с неискаженными и определением числа претерпевших изменения бит. Следует учесть, что такой способ в отличие от рассмотренного ранее хотя и позволяет более рационально использовать пропускную способность канала связи, но при этом дает менее достоверную информацию о его состоянии.

Последний способ основан на вычислении синдрома БЧХ кода для закодированных им данных, разрядность которых аналогична разрядности эталонных данных, принятой для второго способа. При такой оценке, если рассчитанный синдром не равен нулю, предполагается, что в данных присутствуют искажения, в противном же случае утверждается, что данные были переданы без искажений. Особенностью данного способа является то, что в отличие от двух в нем предыдущих отсутствует необходимость в передаче эталонных данных, в связи с чем оценка, хоть и с меньшей точностью, может осуществляться в процессе штатного режима работы системы, наиболее рационально загружая канал связи.

Система адаптивной помехозащищенной передачи

В основе предлагаемого подхода к адаптации лежит оценка состояния канала связи, по результатам которой будет осуществляться выбор разрядно-

сти передаваемых данных и параметров помехозащищенного кода с целью обеспечения заданного уровня надежности передачи в условиях ограниченной пропускной способности канала. Обобщенная структурная схема системы, реализующей данный принцип, представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема системы адаптивной помехозащищенной передачи.

Процесс работы системы можно описать следующим образом. От источника данных (ИД) данные поступают на кодер (К), который осуществляет их помехозащищенное кодирование с помощью некоторого алгоритма и передает далее в зашумленный генератором помехи (ГП) канал связи (КС). Декодер (ДК) декодирует полученную закодированную последовательность и передает ее на приемник данных (ПД), после чего на основе выбранного способа оценки состояния канала связи корректором кода (КК) производится принятие решения об изменении параметров кода, с последующей передачей управляющего воздействия по каналу обратной связи (КОС). Важно отметить, что в данной работе принимается допущение о том, что вероятность возникновения ошибки в КОС равна нулю.

Если состояние КС не позволяет передавать данные с требуемым уровнем достоверности, то формирователем данных (ФД) для передачи выбирается некоторое число старших бит, а оставшаяся часть младших помещается в организованном в виде стека с ограниченным объемом «отложенном» буфере данных (БД). В случае улучшения состояния канала связи ФД принимается решение о передаче данных, хранимых в БД, совместно с данными, поступающими от ИД.

Такой подход здесь и далее предлагается называть принципом «отложенной» точности, при этом следует отметить, что его использование позволяет иметь хотя бы общее представление о передаваемых данных ввиду более высокой информационной полезности старших бит относительно младших при условии, что данные будут нормированы.

Алгоритм помехозащищенное кодирования

С целью обеспечения заданного уровня достоверности передачи данных системой осуществляется их помехозащищенное кодирование с использованием кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ). Этот выбор обосновывается особенностью данного типа кодов, заключающейся в том, что они позволяют исправлять не менее некоторого заранее известного числа ошибок [14]. Данный тип кодов относится к подклассу циклических, и основной особенностью алгоритма их построения является то, что он позволяет исправлять не менее некоторого заранее известного числа ошибок.

Основные параметры кода задаются образующим полиномом, для построения которого необходимо знать длину кода n и его корректирующую способность t . Следует учитывать, что длина кода не может быть задана произвольным образом, а число кодируемых бит k определяется парой значений n и t .

Наибольшее распространение получили простые БЧХ коды, кодовая длина которых удовлетворяет следующему условию: 2^{m-1} , для $m \geq 3$, где m – степень порождающего полинома. Для таких кодов нет простого выражения, позволяющего напрямую связать их параметры с требуемым уровнем помехоустойчивости. Параметры БЧХ кодов для $3 \leq m \leq 8$, длина которых не превышает 255, приведены в таблице.

n	k	t	n	k	t	n	k	t
7	4	1	127	92	5	255	171	11
15	11	1		85	6		163	12
	7	2		78	7		155	13
31	26	1		71	9		147	14
	21	2		64	10		139	15
	16	3		57	11		131	18
	11	5		50	13		123	19
	6	7		43	14		115	21
63	57	1		36	15		107	22
	51	2		29	21		99	23
	45	3		22	23		91	25
	39	4		15	27		87	26
	36	5		8	31		79	27
	30	6	255	247	1		71	29
	24	7		239	2		63	30
	18	10		231	3		55	31
	16	11		223	4		47	42
	10	13		215	5		45	43
	7	15		207	6		37	45
127	120	1		199	7		29	47
	113	2		191	8		21	55
	106	3		187	9		13	59
	99	4		179	10		9	63

Здесь важно учесть, что приведенная таблица параметров БЧХ кодов в своем исходном виде непригодна для использования в предлагаемой системе ввиду ее высокой избыточности. В связи с этим с целью оптимального использования пропускной способности канала связи необходимо произвести удаление лишних записей.

Так, из таблицы должны быть удалены все записи, длина кода которых больше пропускной способности канала связи, затем оставшиеся записи необходимо отсортировать по возрастанию корректирующей способности кодов, числу кодируемых бит и длине кода. Далее, для каждого уникального значения корректирующей способности кода, представленного более чем одной записью из таблицы, необходимо удалить записи, число кодируемых бит которых меньше разрядности данных, а среди оставшихся удаляются все записи, кроме тех, которые обладают максимальным числом кодируемых бит. После этой операции для каждой записи, начиная с последней, проверяется условие превышения кодовой длины текущей записи по сравнению с кодовой длиной записи, расположенной выше, причем если условие не выполняется, то запись нужно удалить.

Например, если пропускная способность канала связи ограничена величиной 64 бита, а разрядность данных составляет 10 бит, то рабочая таблица будет составлена из записей, выделенных в таблице.

Исследование помехозащищенности системы

Исследование предложенных в работе способов оценки состояния канала связи предполагает проверку их эффективности в составе описанной ранее системы адаптивной помехозащищенной передачи.

В качестве математической модели канала связи был выбран двоичный симметричный канал, представляющий собой дискретный канал без памяти, имеющий симметричные вероятности перехода, двоичный алфавит для входа и выхода [15]. Такая модель включает в себя некоторый источник ошибок с известным законом распределения, генерирующий случайную битовую последовательность, каждый элемент которой суммируется по модулю два с соответствующим элементом передаваемого по каналу отсчета.

При проведении исследования были произвольно выбраны следующие предельные значения параметров: пропускная способность канала связи ограничивалась величиной в 256 бит, разрядность данных составляла 12 бит, а размер «отложенного» буфера принимался равным 960 бит. Необходимо учесть, что время моделирования было ограничено величиной 1500 циклов приема/передачи системы. При этом варьировались следующие параметры:

время ожидания отсчета, под которым понимается число циклов приема/передачи системы, в течение которого приемник ожидает получения отсчета. Как только это время истекает, отсчет помечается как переданный, а все его недостающие биты заполняются нулями;

вероятность ошибки в канале связи, где вероятность появления ошибки являлась равномерно распределенной величиной;

частота подстройки кода, под которой понимается число циклов приема/передачи системы, спустя которое происходит оценка состояния канала связи и последующее изменение параметров используемого помехозащищенного кода.

Следует отметить, что независимо от выбранного способа для оценки состояния канала связи использовались тестовые данные. Такой подход не рационален с точки зрения оптимального использования пропускной способности канала, но позволяет произвести сопоставление эффективности алгоритмов, находящихся в равных условиях. Результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3, при этом фиксировались усредненная фактическая ошибка в канале связи с учетом помехозащищенного кодирования и средняя загруженность канала связи.

Рис. 2. Результаты моделирования в случае применения способа адаптации на основе непосредственной оценки состояния канала связи – (а, б) и на оценки результатов декодирования – (в, г).

Рис.3. Результаты моделирования в случае применения способа адаптации на основе вычисления синдрома – (а, б) и без использования адаптации – (в, г).

Предложенные в работе способы оценки состояния канала связи (рис. 2, рис. 3а и 3б) сравнивались со случаем, когда оценка не производится, а данные кодируются кодом с максимальной избыточностью, способным целиком их закодировать (рис. 3в и 3г). Данное решение было принято ввиду того, что такой подход наиболее часто применяется в системах, не использующих адаптацию к состоянию канала, и тем самым относительно него наиболее удобно сравнивать предложенные в работе способы.

Анализ полученных данных показывает, что, как и следовало ожидать, наибольшую достоверность при передаче позволяет достичь способ кодирования данных единственным помехозащищенным кодом. Недостатком такого подхода является максимальная загрузка канала связи избыточным кодом.

Аналогичная ситуация характерна для способа адаптации, основанного на вычислении синдрома закодированного сообщения, показавшего наихудшие результаты с точки зрения надежности передачи. Это можно объяснить тем, что хотя данный способ показывает, были ли искажены данные, однако он не оценивает качество работы помехозащищенного кода.

В связи с этим при статистически отличной от нуля вероятности воз-

никновения ошибки в канале связи данный способ всегда будет выбирать код с максимальной эффективностью кодирования, что в свою очередь не позволит передавать все биты данных в одном сообщении и приведет к переполнению «отложенного» буфера, вызывая существенные искажения в данных.

Среди способов, гарантирующих наиболее рациональное использование пропускной способности канала связи в общем случае, наибольшей эффективностью, обладает способ, основанный на непосредственной оценке состояния канала. При этом в частных случаях (при малых значениях вероятности искажения бит) такой способ по уровню достоверности уступает способу, основанному на оценке результатов декодирования БЧХ кода, но при этом всегда обеспечивает более рациональную загрузку канала.

Заключение

Основываясь на результатах проведенных экспериментов, можно сделать вывод о том, что предложенная в работе система адаптивной помехозащищенной передачи и способы оценки состояния канала связи обеспечивают одновременно как наиболее рациональное использование пропускной способности канала связи, так и достаточно высокую достоверность передаваемых данных.

Дальнейшее развитие предложенных подходов предполагает несколько направлений. Во-первых, – это более полное исследование эффективности работы различных алгоритмов помехозащищенного кодирования в рамках предложенного метода. Во-вторых, разработка узкоспециализированных алгоритмов адаптивного помехозащищенного кодирования, работающих в рамках предложенного метода. Третьим направлением следует считать поиск эффективных способов оценки состояния канала связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. и др. *Современная телеметрия в теории и на практике*. – СПб.: Наука и техника, 2007.
2. Wang W., Zhang Y., Wang X., Xu H. Design of Reconfigurable Real-Time Telemetry Monitoring and Quantitative Management System for Remote Sensing Satellite in Orbit // Proc. of the 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). – Chongqing, China, 2015. – P. 1293-1297.
3. Mikhaylyuk A., Zosimov V., Pereverzev A., Savchenko Y. Low-power Heart Rate Telemetry System // Proc. of the Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – Saint Petersburg and Moscow, 2019. – P. 1636-1638.
4. Konyha J. Off-grid Telemetry System for Hydrate Inhibition on Gas Wells // Proceedings of

- the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC). – Proceedings. – Szilvasvarad, 2015. – P.220-223.
5. *Бородин Л. Ф.* Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. – М.: Сов. радио, 1968.
 6. *Мизин И. А., Уринсон Л. С., Храмешин Г. К.* Передача информации в сетях с коммутацией сообщений. – М.: Связь, 1972.
 7. *Шувалов В. П.* Прием сигналов с оценкой их качества. – М.: Связь, 1979.
 8. *Жидков И.А., Левенец А.В., Чье Ен Ун.* Оценка состояния канала связи по результатам декодирования помехозащищенного кода // Информатика и системы управления. – 2009. – №3(21). – С.72-79.
 9. *Куприянова О. В., Левенец А. В., Чье Ен Ун.* Оценка состояния канала связи по статистике декодирования помехоустойчивых кодов // Вестник ТОГУ. – 2015. – №3(38) – С.111-120.
 10. *Куприянова О. В., Левенец А. В., Чье Ен Ун.* Моделирование систем передачи данных с адаптацией к состоянию канала связи // Вестник НГТУ. – 2016. – Т. 62, №1. – С.120-132.
 11. *Chye En Un, Kupriyanova O.V., Levenets A.V.* Development and research of models of data transmission systems with adaptation to communication channel status and implementation of “deferred precision” principle // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – 2017, 16-19 May, South Ural State University, Chelyabinsk.
 12. *Kupriyanova O.V., Levenets F.V., Chye En Un.* Development and Research of Algorithms of Adaptive Choice of Parameters of Noise Protection Codes in Data Transmission Systems // Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. – 2018, 4 Oct., Vladivostok, Russian Federation.
 13. *Levenets A.V., Chye En Un, Bogachev I.V.* Method of Noise-Protected Transmission of Telemetric Data with Adaptation to the State of the Communication Channel // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. Vladivostok, Russia.
 14. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2005.
 15. *В.П. Шувалов, Н.В. Захарченко, В.О. Шварцман и др.* Передача дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1990.

E-mail:

Богачев Илья Владимирович – ilya.bogachev.pnu@mail.ru;

Левенец Алексей Викторович – levalvi@bk.ru;

Чье Ен Ун – chye@ais.lhstu.ru.