ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА СИГНАЛ

Т. А. Zubov, А. А. Баскова, В. В. Сухотин ✉

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Красноярский край, Российская Федерация

Важным этапом разработки бортового ретрансляционного комплекса является компьютерное моделирование, которое способно оценить влияние тех или иных параметров комплекса на сигнал. Статья посвящена разработке структуры компьютерной модели для оценки влияния параметров бортового ретрансляционного комплекса на сигнал. Основоположающими узлами модели «наземная станция – бортовой ретрансляционный комплекс – наземная станция» являются узлы формирования воздействия, сквозной ретрансляции (реакции), анализа реакции. Рассмотрен принцип формирования сигнала стандарта DVB-S2 и приведена сигнально-кодовая конструкция. Раскрыта типовая структура бортового ретрансляционного комплекса, содержащая приемное и передающее антенно-фидерное устройство, входной и выходной мультиплексор, набор усилителей мощности. Разработана структура компьютерной модели, обладающая необходимым функционалом, а именно: отражением физической сути высокочастотного тракта бортового ретрансляционного комплекса и наземной станции на уровне основных узлов прохождения (смеситель, гетеродин, усилитель мощности, входной и выходной фильтры); возможностью изменения радиотехнических характеристик модели; формированием в модели испытательного сигнала с применением стандартов DVB-S2; измерением вероятности появления битовых ошибок при прохождении сигнала с различными сигнально-кодовыми конструкциями через модель; имитацией искажений сигнала в среде распространения.

Представлен план формирования модели в средах MATLAB/Simulink, состоящий из десяти пунктов. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: бортовой ретрансляционный комплекс, космический аппарат, компьютерное моделирование, сигнально-кодовые конструкции, DVB-S2, структурная схема, MATLAB/Simulink.

Введение

Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) космического аппарата (КА) связи является важнейшей составной подсистемой КА связи и, по существу, является полезной нагрузкой, определяющей его функциональное назначение [1]. Для обеспечения функционирования БРК выделяется основная часть главных ресурсов КА. В современных КА связи надежность и ресурс БРК определяют его срок службы. Важным этапом разработки БРК является компьютерное моделирование, которое способно оценить влияние тех или иных параметров комплекса на сигнал.

Кроме того, при моделировании должно быть рассмотрено функционирование БРК под действием различных искажений в канале связи, не идеальности характеристик высокочастотных (ВЧ) и низкочастотных (НЧ) трактов, вносящих искажения, влияния выбора той или иной сигнально-кодовой конструкции, определяющей показатели качества, такие как помехоустойчивость и пропускная способность.

Формирование структуры

Модель БРК должна быть адекватной оригиналу, она должна с достаточной точностью отображать интересующие характеристики. Основная функция комплекса со сквозной ретрансляцией состоит в приеме сигналов от наземных

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

станций (НС), усилении этих сигналов и последующей передаче их на другие НС с внесением при ретрансляции минимальных искажений и помех. Модель БРК можно воспринимать в единой системе с НС, где она формирует сигнал воздействия, на которое БРК вырабатывает реакцию, анализирующейся на другой НС. Схематичное представление такой модели показано на рис. 1.

Рис. 1. Укрупненная схема модели НС–БРК–НС

Основополагающими узлами приемопередающей системы НС–БРК–НС являются узлы формирования воздействия, сквозной ретрансляции (реакции), анализа реакции. Рассмотрим более подробно эти узлы модели. Воздействие формируется в узлах НС как сигнально-кодовая конструкция, например соответствующая стандарту DVB-S2 [2–5]. Структурная схема формирования такого воздействия показана на рис. 2.

Входной поток данных разбивается на последовательность байт (т. н. таймслоты). В DVB-S2 таймслоты называются UP (UserPacket). Каждый UP проверяется на наличие ошибок дополнительным байтом четности CRC-8. Если входных по-

токов несколько, то формируется синхромаркер для UP каждого канала, а также буферизация для мультиплексирования с временным разделением UP с разных входных потоков в один выходной. Все это происходит в области «ModeAdaptation».

После ModeAdaptation UP-таймслоты представляются в виде единого потока GenericContinuousStream. Затем данный поток «режется» на блоки данных, которые называются DataField (поле данных) и к каждому DataField прикрепляется BB (Baseband) заголовок. Объединение BBHEADER с DataField формируют BBFRAME (Кадр BB), как это показано на рис. 3.

После данного разбиения идет скремблирование данных с «Псевдо Случайной Бинарной Последовательностью» для того, чтобы сделать появление логической единицы или логического нуля равновероятными.

Кодер с прямым исправлением ошибок (FEC) может формировать FECFRAME (кадр FEC) в двух режимах: short (короткий) и normal FECFRAME (обычный). Отличие кадров заключается в их длине: 16200 байт для короткого и 64800 для длинного. Для передачи «полезной» информации (видео, радио) используют нормальные фреймы. Для служебной информации, для которой критично время, используют короткие фреймы. Сначала входной BBFRAME проходит через BCH-кодер, а после через LDPC-кодер, формируя FECFRAME. Для короткого фрейма существует 10 режимов с различными скоростями для BCH и LDPC кодирования, для обычного – 11 вариантов (итого 21 вариант FEC кода), что необходимо для 3 режимов функционирования спутника: постоянная, переменная и адаптивная сигнально-кодовая конструкция.

Рис. 2. Сигнально-кодовая конструкция в стандарте DVB-S2

После кодирования происходит битовое перемещение, т.е. распараллеливание битового потока в зависимости от выбора типа модуляции: QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) – по 2 бита; 8PSK (Eighth Phase Shift Keying) – по 3 бита; 16APSK (Amplitude-Phase Shift Keying) – по 4 бита; 32APSK – по 5 бит. Затем данные опять синхронизируются и скремблируются. После этого, для ограничения полосы спектра, сигнал проходит фильтрацию – корень из приподнятого косинуса. Затем полоса сигнала фильтруется, усиливается и посредством конвертера переносится в область ВЧ.

Данный ВЧ-сигнал посредством влияния канала прохождения от НС до БРК ослабляется и искажается (аддитивные, фазовые, частотные шумы и т.д.). Принятый антенно-фидерным устройством (АФУ) сигнал поступает в приемное устройство, в котором осуществляется усиление сигналов с малым уровнем собственных флуктуационных помех (шумов), преобразование частоты (с $f_{\text{пр}}$ на $f_{\text{прд}}$). Далее сигналы поступают на входной мультиплексор (IMUX), в котором осуществляется выделение отдельных частотных стволов, принятых

единым групповым сигналом приемным АФУ и приемным устройством, затем сигналы каждого ствола усиливаются своим усилителем мощности (УМ) и складываются вместе особым устройством – выходным мультиплексором (OMUX). Типовая структура [1] современного многоствольного БРК со сквозной ретрансляцией для КА связи на геостационарной орбите представлена на рис. 4.

Далее ВЧ-сигнал (реакции), ослабленный и искаженный каналом, возвращается на НС. На наземной станции спектр принимаемого сигнала выделяется посредством полосового фильтра, усиливается малошумящим усилителем, переносится в область промежуточной частоты, где сигнал снова усиливается, фильтруется и переносится в область нулевой частоты. На нулевой частоте сигнал оцифровывается, фильтруется, демодулируется и декодируется в обратном порядке схемы на рис. 2. Во время обработки сигнала на приемной стороне восстанавливается частота, частота тактирования, битовая и кадровая синхронизация.

Таким образом, переданные данные для формирования ВЧ воздействия можно сравнить с при-

Рис. 3. Формирование BBFRAME DVB-S2

Рис. 4. Типовая структура [1] современного многоствольного БРК

нятыми декодированными данными реакции БРК. Критерием оценки для цифровых данных выступит вероятность появления ошибочного бита, посредством чего можно оценить качество используемого БРК. Также для большей достоверности можно анализировать отношение сигнала к шуму в разных точках модели и другие характеристики БРК. В качестве негативных факторов будут выступать аддитивный, тепловой, фазовый, частотный шум и прочие помехи. Структурная схема компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал будет выглядеть [6] как показано на рис. 5.

Компьютерная модель должна обладать следующим функционалом:

- отражение физической сути ВЧ тракта БРК и НС на уровне основных узлов прохождения (смеситель, гетеродин, усилитель мощности, входной и выходной фильтр);

- возможность изменения радиотехнических характеристик модели;
- формирование в модели испытательного сигнала с применением стандартов DVB-S2;
- измерение вероятности появления битовых ошибок при прохождении сигнала с различными сигнально-кодowymi конструкциями через модель;
- имитация искажений сигнала в среде распространения.

План формирования модели и выводы

Данная модель может быть реализована в пакете MATLAB/Simulink [7–9], затем полученная блок-схема конвертируется в текстовый MATLAB m-файл, который в последствии может быть интегрирован с программным обеспечением высокого уровня, разработанного в среде LabVIEW.

Рис. 5. Структурная схема компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал

План формирования модели в средах MATLAB/Simulink [10–12] будет следующим:

1. На передающей стороне модели НС будет формироваться сигнально-кодковая конструкция посредством последовательно соединенных блоков Simulink, которые последовательно преобразовывают входные потоки данных в потоки UP (DVB-S2). Далее потоки UP будут преобразованы в кадры BB, которые будут подвержены каналному кодированию через последовательно стоящие кодеры BCH и LDPC, формирующие FEC-кадры. Затем перемежение FEC-кадров позволит сформировать констелляционное созвездие (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK).

2. На передающей стороне будут задаваться характеристики канала связи между моделями НС и БРК, который ослабляет сигнал, вносит аддитивную помеху, фазовый и частотный сдвиг.

3. Также на передающей стороне будет сформирована модель ВЧ тракта, в состав которой с неидеальными характеристиками будут входить: смеситель, усилитель мощности, входной и выходной фильтры.

4. Приемная сторона БРК будет принимать ВЧ сигнал, фильтровать его полосовым филь-

тром, усиливать малошумящим усилителем, посредством смесителя переносить сигнал на другую частоту, усиливать и снова фильтровать. Каждый ВЧ блок будет с неидеальными характеристиками.

5. Выходящий сигнал с БРК будет проходить через блок модели канала, который внесет дополнительные искажения.

6. На приемной стороне ослабленный и искаженный сигнал будет проходить через модель гетеродинного приемника. Сигнал будет ограничен по полосе, усилен малошумящим усилителем, перенесен в область промежуточной частоты и т.д. Каждый ВЧ блок будет с неидеальными характеристиками.

7. Принятая и пониженная по частоте сигнально-кодковая конструкция будет последовательно детектирована в демодуляторе (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK), декодирована в LDPC и BCH кодерах, на выходе которых будет получен приемный поток данных BB, который будет восстановлен в последовательность данных.

8. Переданные и принятые данные будут проанализированы посредством расчета вероятности появления ошибочного бита.

9. Модель будет предусматривать возможность изменения характеристик сигнально-кодовой конструкции, высокочастотных трактов, каналов связи, таких как мощность, фаза, частота сигнала, мощность аддитивного, фазового и частотного шумов, характеристик скорости кодеров (в соответствии с DVB-S2), выбора модуляции (в соответствии с DVB-S2), нейтральности ВЧ филь-

тров, смесителей, усилителей и т. д.

10. Simulink-модель будет конвертирована в m-функции MATLAB для вызова их из среды LabVIEW.

Результаты компьютерного моделирования станут основой для формирования технических требований к отдельным блокам и в целом к разрабатываемому БРК.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки России в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.578.21.0247 от 26.09.2017 г., уникальный номер проекта RFMEFI57817X0247).

Список литературы

- [1] Орлов А. Г., Севастьянов Н. Н. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / науч. ред. В. Н. Бранец. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 206 с.
- [2] ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). ETSI, European Standard (Telecommunications series), 2009, 78 p.
- [3] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ.; изд. 2-е, испр. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
- [4] Морелос-Сарагаса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Техносфера, 2005. 320 с.
- [5] Feoktistov D. S., Bondarenko V. N., Garifullin V. F., Krasnov T. V., Bogatyrev E. V. Narrow band interference immunity of correlation receiver with BOC and MSK-BOC modulation type // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus), 2018. doi: 10.1109/EConRus.2018.8317277
- [6] Зубов Т. А., Сухотин В. В. Выбор и обоснование среды моделирования бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата // Тез. докл. XXI Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск. 2018. С. 204–207.
- [7] Lynn A., Smid E., Eshraghi M., Caldwell N., Woody D. Modeling hydraulic regenerative hybrid vehicles using AMESim and Matlab/Simulink. Orlando, Enabling Technologies for Simulation Science IX (Proceedings of SPIE), vol. 5805, 2005, pp. 24–40. doi: 10.1117/12.603712
- [8] Дьяконов В. П. VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М. : СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с.
- [9] Дьяконов В. П. Simulink. Самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2015. 782 с.
- [10] Дьяконов В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. М. : ДМК Пресс, 2010. 976 с.
- [11] Communications System Toolbox. Проектирование систем связи на физическом уровне. М. : ЦИТМ Экспонента, 2015. 8 с.
- [12] Дьяконов В. П. Проектирование и моделирование СВЧ-устройств в MATLAB R2010 // Компоненты и технологии. 2011. № 6. С. 127–138.

FORMATION OF STRUCTURE COMPUTER MODEL FOR ASSESSMENT OF THE IMPACT PARAMETERS OF AN ONBOARD RELAYING COMPLEX ON A SIGNAL

T. A. Zubov, A. A. Baskova, V. V. Sukhotin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Important development stage of an onboard relaying complex is computer simulation which is capable to estimate influence of these or those parameters of a complex on a signal. Article is devoted to development of structure of computer model for impact assessment of parameters of an onboard relaying complex

on a signal. Fundamental nodes of model a ground station – an onboard relaying complex – a ground station are nodes of forming of influence, through relaying (reaction), the analysis of reaction. In article the principle of forming of a signal of DVB-S2 standard is considered and signal and code construction is given. The standard structure of an onboard relaying complex containing the receiving and transmitting antenna feeder device, the input and output multiplexer, set of power amplifiers is disclosed. The structure of computer model having necessary functionality is developed namely: reflection of a physical essence of a high-frequency path of onboard relaying complex and ground station at the level of the main nodes of passing (the mixer, a heterodyne, the power amplifier, the inlet and outlet filter); possibility of change of radio engineering characteristics of model; forming in model of a measuring signal using the DVB-S2 standards; measurement of probability of emergence of bit errors when passing a signal with different signal and code constructions through model; simulation of signal distortions in the environment of distribution.

The plan of forming of model in the MATLAB/Simulink environments consisting of ten points is presented. The corresponding conclusions are drawn.

Keywords: onboard relaying complex, spacecraft, computer simulation, signal and code constructions, DVB-S2, block diagram, MATLAB/Simulink.

References

- [1] Orlov A. G., Sevastyanov N. N. *Bortovoj retranslyacionnyj kompleks (BRK) sputnika svyazi. Principy raboty, postroyeniye, parametry* [Onboard Relaying Complex (ORC) of the communication satellite. Principles of work, construction, parameters]. Tomsk, Publishing house of the Tomsk state university, 2014, 206 p. (In Russian)
- [2] ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). ETSI, European Standard (Telecommunications series), 2009, 78 p.
- [3] Sklyar B. *Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, Izdatelskiy dom Vilyams, 2003, 1104 p. (In Russian)
- [4] Morelos-Saragasa R. *Iskusstvo pomekhoustojchivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye* [Art of noiseproof coding. Methods, algorithms, application]. Moscow, Technosphere, 2005, 320 p. (In Russian)
- [5] Feoktistov D. S., Bondarenko V. N., Garifullin V. F., Krasnov T. V., Bogatyrev E. V. Narrow band interference immunity of correlation receiver with BOC and MSK-BOC modulation type // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317277
- [6] Zubov T. A., Sukhotin V. V. *Vybor i obosnovaniye sredy modelirovaniya bortovogo retranslyacionnogo kompleksa kosmicheskogo apparata* [The Choice and Justification of the Modeling Environment for an On-Board Relay Complex of a Spacecraft] // *Tezisy dokladov XXI Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennyye problemy radioelektroniki»* [Abstracts of the XXI All-Russia scientific and technical conference «Modern problems of radio electronics»]. Krasnoyarsk, 2018, pp. 204–207. (In Russian)
- [7] Lynn A., Smid E., Eshraghi M., Caldwell N., Woody D. Modeling hydraulic regenerative hybrid vehicles using AMESim and Matlab/Simulink. Orlando, Enabling Technologies for Simulation Science IX (Proceedings of SPIE), vol. 5805, 2005, pp. 24–40. doi: 10.1117/12.603712
- [8] Dyakonov V. P. *VisSim + Mathcad + MATLAB. Vizual'noye matematicheskoye modelirovaniye* [VisSim + Mathcad + MATLAB. Visual mathematical modeling]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 384 p. (In Russian)
- [9] Dyakonov V. P. *Simulink. Samouchitel'* [Simulink. Self-instruction manual]. Moscow, DMK Press, 2015, 782 p. (In Russian)
- [10] Dyakonov V. P. *MATLAB R2007/2008/2009 dlya radioinzhenerov* [MATLAB R2007/2008/2009 for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 2010, 976 p. (In Russian)
- [11] *Communications System Toolbox. Proektirovaniye sistem svyazi na fizicheskom urovne* [Communications System Toolbox. Design of communication systems at the physical level]. Moscow, TsITM of the Exhibitor, 2015, 8 p. (In Russian)
- [12] Dyakonov V. P. *Proektirovaniye i modelirovaniye SVCH-ustrojstv v MATLAB R2010* [Design and modeling of microwave devices in MATLAB R2010] // *Components and technologies*, 2011, no. 6, pp. 127–138. (In Russian)