

**И. Е. Никульский¹, О. А. Степуленок¹, Г. Г. Бундин², Т. Г. Помозова³,
В. Б. Поляков³**

¹ ОАО «ЦНПО «Ленинец», ² АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», ³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ С ВОЛНОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

В статье рассматривается возможность построения высокоскоростной объектовой локальной сети, в основе которой лежит новая отечественная высокопроизводительная кластеризованная бортовая вычислительная платформа на базе 64-разрядного процессора «Эльбрус» – ВС-3416 с применением оригинальной высоконадежной физической среды. Повышение надежности оптической объектовой локальной сети обеспечивается автоматическим восстановлением ее работоспособности при возникновении однократных разрывов линий связи за счет дублирования линий передачи по длинам волн (волнового уплотнения), а не дублирования волокон, как в традиционных сетях. Приводится аналитическая модель для оценки показателей надежности предлагаемой отказоустойчивой волоконно-оптической кольцевой сети с волновым разделением, дублированием волновых каналов и самовосстановлением. Применение кольцевой оптической сети позволяет обеспечить симметрию пропускной способности направлений передачи, увеличить скорость передачи за счет применения принципа волнового уплотнения.

Ключевые слова: процессор, модульная авионика, помехоустойчивость, надежность, центральное устройство коммутации

Введение

Построение современных бортовых целевых радиоэлектронных комплексов (РЭК) [1] требует организации мощных локальных сетей передачи данных (ЛСПД). Одним из перспективных направлений создания таких сетей представляется применение новой отечественной высокопроизводительной унифицированной бортовой кластеризованной вычислительной платформы ВС-3416 на базе процессора «Эльбрус», использующей идеологию интегрированной модульной авионики. Данная вычислительная платформа имеет расширенную интерфейсную базу [1], включающую не только традиционные электрические интерфейсы – ARINC-429, магистрального канала информационного обмена (МКИО) и других, но и современный оптический интерфейс FC-AE [1].

При решении задач построения таких локальных сетей важнейшим фактором является обеспечение высокой помехоустойчивости, надежности и отказоустойчивости широкополосной физической среды распространения, использующей бортовые волоконно-оптические кабели в качестве линий связи.

ЛСПД с волновым разделением

Предлагается вариант построения многоволновой одноволоконной высоконадежной оптической

ЛСПД с автоматическим восстановлением работоспособности при обрывах линий благодаря дублированию используемых длин волн. При этом достигается снижение объема линейных сооружений ЛСПД по сравнению с вариантами, использующими дублирование волокон. В предлагаемой ЛСПД осуществлено дублирование направлений передачи по длинам волн [2], а не пространственное дублирование волокон.

На основе изобретенного авторами варианта построения высоконадежной оптической сети можно создавать различные высокопроизводительные локальные сети, не требующие для их реализации больших объемов оптических линейных сооружений.

Сегмент предлагаемой ЛСПД показан на рис. 1.

Центральный коммутатор пакетов (ЦКП) используется для пакетного обмена информацией между пользователями сети. Оптические трансиверы центрального узла (ППЦ) и периферийных узлов (ППП) преобразуют электрические сигналы в свет и осуществляют обратное преобразование, а также формируют аварийные сигналы оптических интерфейсов.

Пассивные оптические узлы (M_1 , M_2) предназначены для объединения информационных потоков, транслируемых на различных длинах волн, в общий многоволновый сигнал, а также для разделения

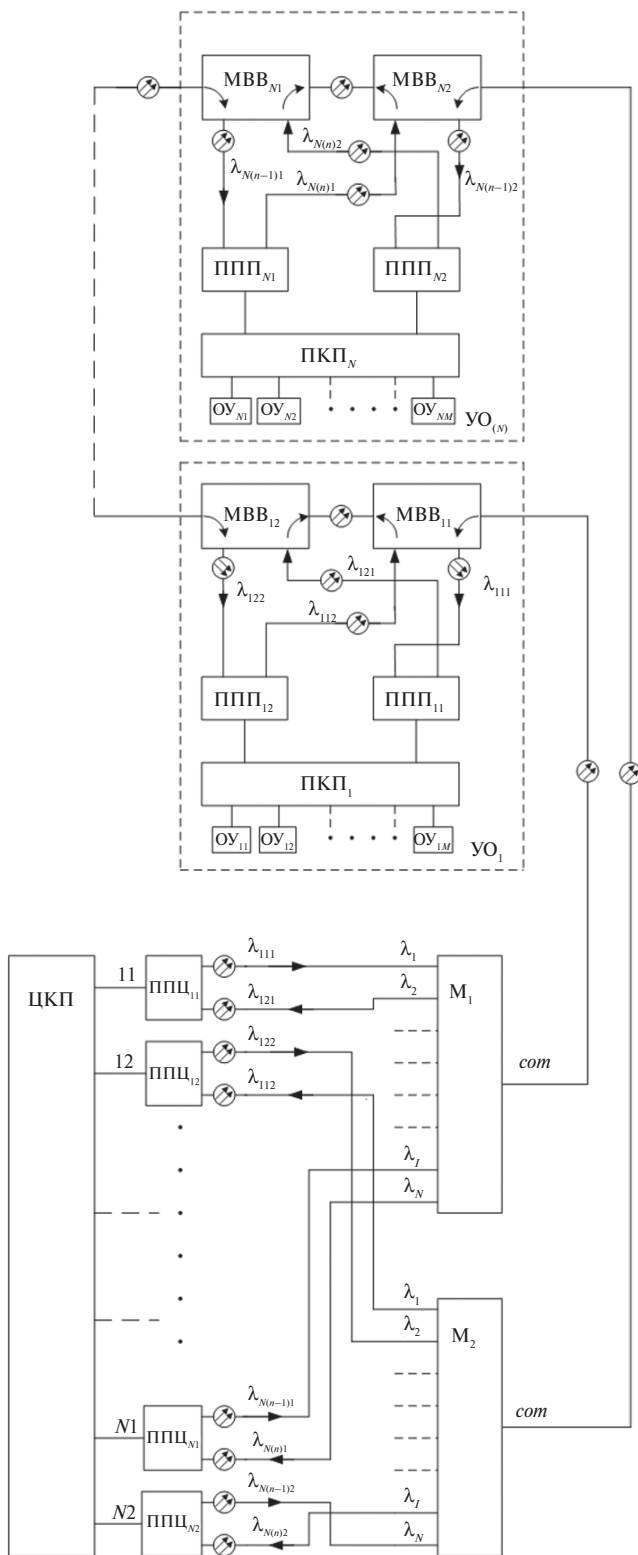


Рисунок 1. Структура кольцевого сегмента: ЦКП – центральный коммутатор пакетов; ППЦ – приемо-передатчики оптические центрального узла; M_1, M_2 – мультиплексоры оптические центрального узла; МВВ – пассивные оптические мультиплексоры ввода-вывода периферийных узлов; ППП – приемо-передатчики оптические периферийных узлов; ПКП – периферийные коммутаторы пакетов; ОУ – оконечные устройства; УО – узловое оборудование периферийных узлов

общих сигналов, поступающих из кольцевых линий, на компонентные волновые сигналы, подаваемые на входы используемых трансиверов.

Пассивные узлы (МВВ) выделяют компонентные оптические сигналы абонентов сети, а также пропускают сигналы других длин волн транзитом. Периферийные коммутаторы пакетов (ПКП) реализуют взаимодействие с ЦКП и управление переходами на резервные волновые тракты в случаях отказов линий или аппаратуры.

Оборудование абонентов (ОУ) предназначено для обмена информацией пользователей (абонентов), а также для реализации совокупности сетевых протоколов и абонентских интерфейсов. Данное оборудование может присоединяться к периферийному оборудованию сети – навигационным системам, системам воздушных сигналов, магнитометрическим системам и другим [1] посредством традиционных интерфейсов – ARINC-429, МКИО и др. При этом в УО производится первичная обработка, запись на накопители поступающих данных и агрегирование информационных потоков. Кроме этого, ОУ могут представлять собой высокопроизводительные унифицированные рабочие места операторов целевого РЭК.

Полная логическая прозрачность предлагаемой среды распространения с волновым разделением позволит использовать в составе ЦКП и ПКП, построенных на базе ВС-3416, различные сетевые интерфейсы и технологии (при наличии сменных унифицированных сетевых карт с оптическими приемопередатчиками, настроенными на различные длины волн), такие как FC-AE, AFDX [1] и др.

Аббревиатурой УО обозначена функциональная группа оборудования периферийных узлов, что необходимо для более наглядного представления модели надежности, показанной на рис. 1. При этом оборудование узлов строится так, что при отказе аппаратуры или линий одного из направлений не будут обнаруживаться только длины волн λ_{111} и λ_{121} , поступающие справа, либо сигналы λ_{122} и λ_{112} , поступающие слева.

Вследствие таких отказов будут пропадать волновые сигналы только на одной группе портов, а сигналы, поступающие на иные порты на других длинах волн, останутся без критических изменений параметров, и связь с группой пользователей пропадет только при многократных обрывах линейных сооружений [2]. При этом должна быть обеспечена правильная настройка коммутаторов и дублированные порты должны быть агрегированы в одну группу посредством настройки процедуры Link aggregation или реализации других процедур перехода на резерв.

Очевидно, что для организации бортовых сетей специального назначения должны использоваться

соответствующие отечественные перспективные волоконно-оптические компоненты и специализированное программное обеспечение, которое устанавливается на ВС-3416 и позволяет осуществлять коммутацию пакетов информации.

Описание модели надежности ЛСПД

В рамках анализа модели надежности целесообразно определить коэффициент готовности сети при заданных коэффициентах готовности ее элементов. При этом предполагается, что все отказы не зависят друг от друга, а интервалы между ними, как и интервалы восстановлений, распределены по закону Пуассона. Под отказом понимается пропадание связи пользователей, подключенных к узлу.

Модель надежности [3, 4] показана на рис. 2а, а на рис. 2б приведена модель надежности пассивных линейных сооружений этой части сети.

Выражение для определения коэффициента готовности участка кольцевой сети $K_{гс}$ имеет вид

$$K_{гс} = K_{гц} K_{гл} K_{гy} (1 - (1 - K_{гпц1}) \times (1 - K_{гпц2})) (1 - (1 - K_{гм1}) (1 - K_{гм2})). \quad (1)$$

При условии равенства коэффициентов готовности всех ППП и всех МВВ

$$K_{гпцi1} = K_{гпцi2} = K_{гпцi};$$

$$K_{гм1} = K_{гм2} = K_{гм},$$

выражение (1) можно записать в виде:

$$K_{гс} = K_{гц} K_{гл} K_{гy} (1 - (1 - K_{гпцi})^2) (1 - (1 - K_{гм})^2), \quad (2)$$

где

$$K_{гл} = (1 - (1 - \prod_{i=1}^N K_{гли1})) (1 - \prod_{i=1}^N K_{гли2}) \times (1 - (1 - \prod_{i=1}^k K_{гви1}) (1 - \prod_{i=1}^l K_{гви2})),$$

где N – число узлов в рассматриваемой части сети, k – число сегментов кольцевых линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 1 i -го узла, l – число участков линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 2 i -го узла, $k + l = N + 1$. При условии равенств

$$K_{гли1} = K_{гли2} = K_{гл};$$

$$K_{гви1} = K_{гви2} = K_{гв},$$

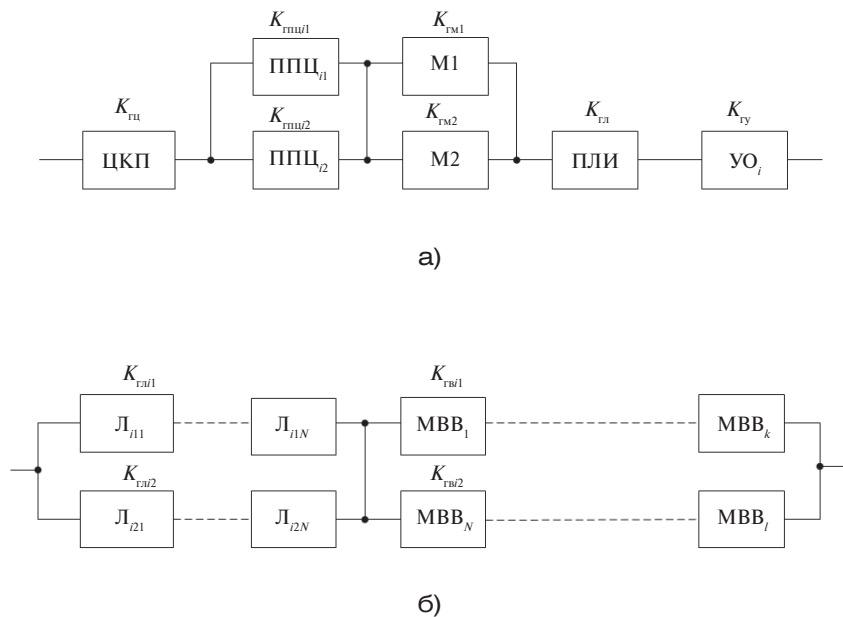


Рисунок 2. Модель надежности сегмента сети: а – модель надежности сегмента сети; б – модель надежности ПЛИ сегмента сети; ПЛИ – пассивная линейная инфраструктура; $L_{i1} \dots L_{iN}$ – сегменты кольцевых линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 1 i -го узла; $L_{j21} \dots L_{j2N}$ – сегменты кольцевых линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 2 i -го узла; $МВВ_1 \dots МВВ_k$ – МВВ узлов, расположенных со стороны 1 i -го узла; $МВВ_N \dots МВВ_l$ – МВВ узлов, расположенных со стороны 2 i -го узла; $K_{гц}$ – коэффициент готовности ЦКП; $K_{гпцi1}$ – коэффициент готовности основных передатчиков центрального узла; $K_{гпцi2}$ – коэффициент готовности резервных передатчиков центрального узла; $K_{гм1}$, $K_{гм2}$ – коэффициенты готовности M_1 и M_2 соответственно; $K_{гл}$ – коэффициент готовности ПЛИ; $K_{гy}$ – коэффициент готовности i -го УО; $K_{гли1}$ – коэффициенты готовности сегментов кольцевых линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 1 i -го узла; $K_{гли2}$ – коэффициенты готовности сегментов кольцевых линий, связанных с узлами, расположенными со стороны 2 i -го узла; $K_{гви1}$ – коэффициенты готовности МВВ узлов, расположенных со стороны 1 i -го узла; $K_{гви2}$ – коэффициенты готовности МВВ узлов, расположенных со стороны 2 i -го узла

выражение (2) можно представить в виде:

$$K_{гд} = (1 - (1 - NK_{гд})^2)(1 - (1 - (N + 1)K_{гв})).$$

Аналогичным образом [5] может быть построена модель надежности УО_г и определен $K_{гв}$.

Выводы

Предлагаемая высокопроизводительная ЛСПД с волновым разделением обеспечивает следующие преимущества:

- экономия линейных сооружений по сравнению с вариантами, использующими пространственное резервирование волокон;
- при одиночных обрывах линий и отказах трансиверов обеспечивается автоматический переход на резерв;
- реализация повышенной (до 80–90 Гбит/с) скорости передачи;
- высокая пропускная способность за счет предоставления абонентам возможности передачи на различных длинах волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективный облик и технологии разработки комплексов бортового оборудования воздушных судов / Е. А. Федосов, Г. А. Чуянов, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Полет. 2013. № 8. С. 44–52.
2. Патент РФ на изобретение № 2548162 / 19.03.2015. Никульский И. Е., Степуленок О. А., Чекстер О. П., Калинин А. А. Высоконадежная кольцевая оптическая сеть.
3. Надежность технических систем / под ред. Н. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
4. Голинкевич Т. А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа, 1985. 168 с.
5. Левин Б. Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические основы). М.: Советское радио, 1978. 263 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никульский Игорь Евгеньевич, д.т.н., доцент, главный специалист, зам. главного конструктора, ОАО «ЦНПО «Ленинец», Российская Федерация, 196066, Санкт-Петербург, Московский пр., 212, тел.: 8 (911) 296-45-75, e-mail: i.nikulsky@npo-leninets.ru.

Степуленок Олег Александрович, ведущий инженер, ОАО «ЦНПО «Ленинец», Российская Федерация, 196066, Санкт-Петербург, Московский пр., 212, тел.: 8 (911) 281-61-69, e-mail: ostepulenok@mail.ru.

Бундин Герман Георгиевич, д.т.н., старший научный сотрудник, АО «НПП «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (921) 924-33-75, e-mail: bundin.g@ya.ru.

Помозова Татьяна Геннадьевна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (905) 218-84-82, e-mail: pomozova-tatyana@yandex.ru.

Поляков Вадим Борисович, д.т.н., доцент, профессор кафедры, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (911) 986-27-06, e-mail: vadim7702@yandex.ru.

*For citation: Nikulskiy I.E., Stepulenok O.A., Bundin G.G., Pomozova T.G., Polyakov V.B. Reliability model of optical circular net with wave division. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 1, pp. 41–45
DOI 10.21778/2218-5453-2019-1-41-45*

I.E. Nikulskiy, O.A. Stepulenok, G.G. Bundin, T.G. Pomozova, V.B. Polyakov

RELIABILITY MODEL OF OPTICAL CIRCULAR NET WITH WAVE DIVISION

It is considered the possibility of construction of the high-speed object local net based on new domestic highly efficient clustered on-board computing platform on the basis of 64-bit Elbrus (BC-3416) processor with use of original high-reliability physical environment. Increasing of the optical object local net reliability is ensured by automatic restoration of such net in the case of single break of communication link using dual-redundant communication lines by wave lengths (wave compression) instead of fibers duplication as it was made in traditional nets. An analytical model is presented to assess the reliability indicators of the proposed fault-tolerant fiber-optic circular net with wave separation, wave channels redundancy and self-recovery. Use of circular optic net allows to provide the symmetry of transmitting directions capacity, increasing of transmission speed with use of wave compression principle.

Keywords: processor, modular avionics, noise immunity, reliability, central commutation equipment

REFERENCES

1. Fedosov E. A., Chuyanov G. A., Kosyanchuk V. V., Selvesyuk N. I. Future image of technology and the development of the aircraft onboard equipment. *Polet*, 2013, no. 8, pp. 44–52. (In Russian).
2. Patent RUS No. 2548162 / 19.03.2015. Chekster O. P., Kalinin A. A., Nikulskij I. E., Stepulenok O. A. Highly reliable optical ring network. (In Russian).

3. Ushakov N.A., editor. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985, 608 p. (In Russian).
4. Golinkovich T.A. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti* [Applied theory of reliability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 168 p. (In Russian).
5. Levin B.R. *Teoriya nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem (matematicheskie osnovy)* [Theory of reliability of radio systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978, 263 p. (In Russian).

AUTHORS

Nikulskiy Igor, D. Sc., associate professor, chief specialist, deputy chief designer, Leninetz JSC, 212, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 196066, Russian Federation, tel.: +7 (911) 296-45-75, e-mail: i.nikulsky@npo-leninetz.ru.

Stepulenok Oleg, principal engineer, Leninetz JSC, 212, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 196066, Russian Federation, tel.: +7 (911) 281-61-69, e-mail: ostepulenok@mail.ru.

Bundin German, D. Sc., Senior Staff Scientist, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (921) 924-33-75, e-mail: bundin.g@ya.ru.

Pomozova Tatyana, Ph. D., associate professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (905) 218-84-82, e-mail: pomozova-tatyana@yandex.ru.

Polyakov Vadim, D. Sc., associate professor, professor of the Chair, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (911) 986-27-06, e-mail: vadim7702@yandex.ru.