

УДК 621.391.63:681.7.068

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-7

Александров Д.Д.  
Косов Е.О.  
Архипов С.Н.**ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ПАССИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ ПУТЕМ  
ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МАРШРУТОВ**

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия

*e-mail: danillaleksandrov57@mail.ru*

**Аннотация**

В работе рассматривается один из вариантов решения задачи повышения живучести пассивных оптических сетей на основе представления сети в виде оптического многополюсника с использованием теории матриц рассеяния и передачи

**Ключевые слова:** пассивные оптические сети; живучесть; связность; оптические делители; оптическое сетевое окончание; оптическое линейное окончание; матрицы рассеяния и передачи; многополюсник.

UDC 621.391.63:681.7.068

Aleksandrov D.D.  
Cosov. E.O.  
Arkhipov S.N.**IMPROVING THE LIFE OF THE PASSIVE OPTICAL NETWORK  
BY FORMING ADDITIONAL ROUTES**

Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302034, Russia

*e-mail: danillaleksandrov57@mail.ru*

**Abstract**

The paper discusses one of the solutions to the problem of increasing the survivability of passive optical networks based on the representation of the network as an optical multipole using the theory of scattering matrices and transmission

**Keywords:** passive optical networks; vitality; connectivity; optical dividers; optical network termination; optical linear termination; scattering and transmission matrices; multipole.

**ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, элементы обработки волновых потоков, а именно оптические делители (ОД), фильтры и аттенюаторы относятся к "сетевым элементам", выполняющим сетевые функции (СЭФ) в пределах логического объекта. Понимая под логическим объектом сеть, построенную по технологии *PON* и учитывая требования ГОСТ Р 53111-2008 предлагается анализ эффекта разветвления на основе свойств сети древовидной структуры. Анализ [1] показал, что решение задачи повышения живучести через увеличение связности сети приводит к необходимости формирования дополнительных направлений связи и возможности резервирования энергетического потенциала источника, при этом, резервирование потенциала источника должно осуществляться за счет использования оптических делителей с изменяемым коэффициентом деления при оптимальном распределении бюджета мощности с неравномерным распределением энергии по направлениям.

Воспользовавшись представлением сети в виде "оптического многополюсника" на основе подходов теории матриц рассеяния и передачи [2, 3] определим основные энергетические условия реализации задачи повышения живучести через увеличение связности и резервирование энергетического потенциала. Данный подход справедлив, поскольку в *PON* сетях используются

только линейные пассивные элементы, а присоединяемые оптические волокна (ОВ) имеют идентичные параметры.

Обобщенная схема типовой PON сети, может быть представлена в виде каскадного параллельно-последовательного соединения  $2N$  многополюсников с учетом известных соотношений взаимосвязи коэффициентов матриц рассеяния и матриц передачи ОВ-ОД, показанная на рисунке 1.

Значения коэффициентов деления ОВ-ОД, при принятой нумерации в обобщенной схеме PON сети запишем в виде матрицы строки  $\mathbf{K}$

$$\mathbf{K} = k_{11}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{iN}, \dots, k_{Mj}, \dots, k_{MN}, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, M$  – определяют номер выхода/входа оптического сетевого окончания (ONT);  $j = 1, 2, \dots, N$  – задают номер уровня PON сети, на котором расположен ОВ-ОД – элемент матрицы.

Каждый элемент сети, как  $2N$  многополюсник оптического диапазона характеризуется коэффициентом отражения

$$\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_{11}, \dots, \Gamma_{i,j}, \dots, \Gamma_{iN}, \dots, \Gamma_{Mj}, \dots, \Gamma_{MN}]. \quad (2)$$

Тогда, при известной общей  $P_0(\lambda)$  мощности на выходе оптического линейного окончания (OLT) сети, на входе каждого ONT получим входную мощность оптического (прямого) потока, определяемую соотношением

$$P_{ij}(\lambda) = P_0(\lambda) \left( \prod_{j=1}^N (1 - |\Gamma_{ij}(\lambda)|^2) (W_{ij}(\lambda))^{\ell_{i,j}} \frac{1}{k_{ij}(\lambda)} \right), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны распределяемого по сети волнового потока;  $W_{ij}(\lambda)$  – затухание в волокне в зависимости от длины  $\ell_{i,j}$  линии соответствующего  $j$ -го уровня PON сети.

Каскадное соединение многополюсников можно представить в виде объединения блочных  $\mathbf{S}$ -матриц рассеяния. Воспользовавшись данным представлением, для каждого уровня PON сети получим отдельную матрицу рассеяния:

$$\mathbf{S}^N = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N & \vdots & \mathbf{S}_{\beta\beta}^N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^{N-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} & \vdots & \mathbf{S}_{\beta\gamma}^{N-1} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\beta}^{N-1} & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{N-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{S}^{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{III} & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\mu}^{III} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\gamma}^{III} & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\mu}^{III} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\mu\mu}^{II} & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\nu}^{II} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\mu}^{II} & \vdots & \mathbf{S}_{\nu\nu}^{II} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^I = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\nu\nu}^I & \vdots & \mathbf{S}_{\nu o}^I \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{o\nu}^I & \vdots & \mathbf{S}_{oo}^I \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где матрицы:  $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N$  – определяет коэффициенты отражения волнового потока на входе многополюсника и коэффициенты взаимной связи между его входами;  $\mathbf{S}_{\beta\alpha}^N$  – определяет коэффициент передачи со входа многополюсника сетевого уровня  $N$  на его выход;  $\mathbf{S}_{\alpha\beta}^N$  – определяет коэффициенты передачи волнового потока многополюсника с выхода на его вход;  $\mathbf{S}_{\beta\beta}^N$  – определяет коэффициенты отражения от выхода многополюсника и взаимосвязи между

различными выходами; обозначения (индексы)  $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \nu, o$  – определяют границы групп входов (выходов) многополюсников соответствующих  $(N, N - 1, III, II, I, O)$  уровней сети.

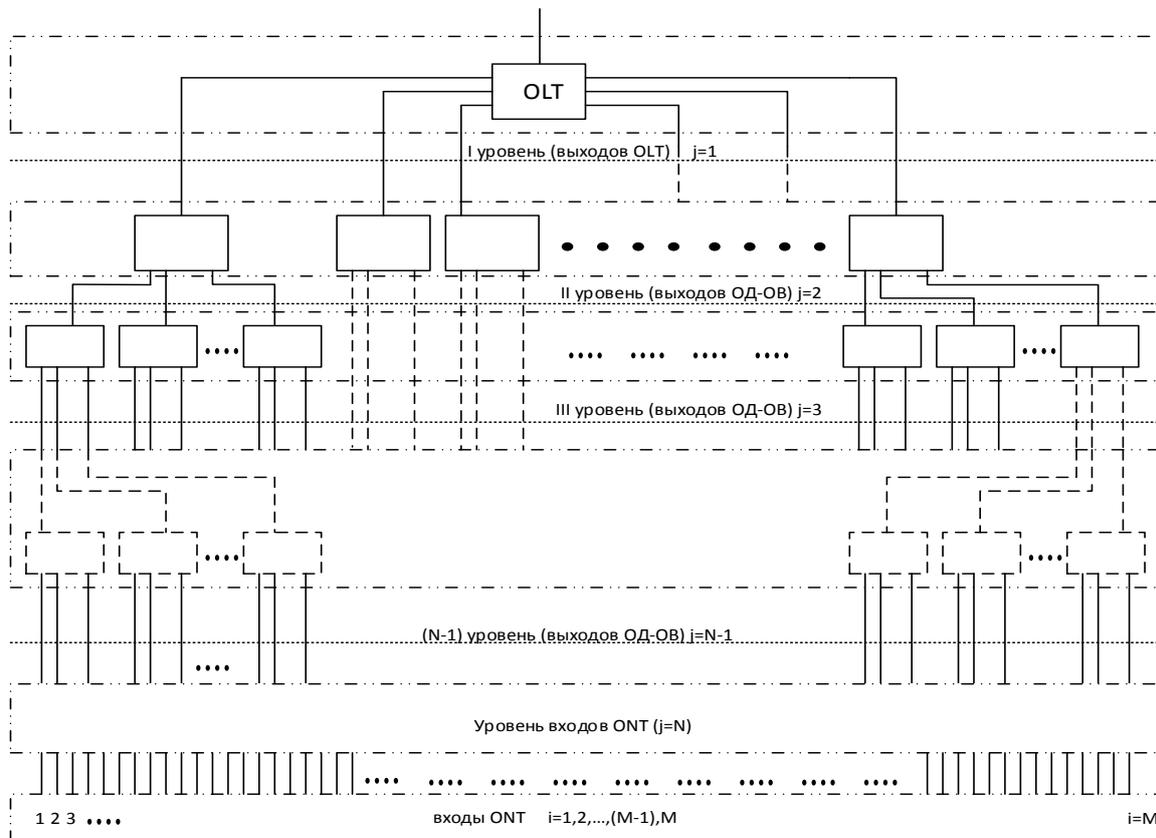


Рис. Обобщенная структура PON сети в виде каскадно-последовательного соединения  $2N$  многополюсников

Fig. The generalized structure of the PON network in the form of a cascade-series connection of  $2N$  multipoles

Выполняя объединение многополюсников уровня  $N$  и  $N - 1$ , получим:

$$\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(N, N-1)} = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N + \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N, \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_{\alpha\gamma}^{\Sigma(N, N-1)} = \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\gamma}^N, \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_{\gamma\alpha}^{\Sigma(N, N-1)} = \mathbf{S}_{\gamma\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^N \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1})^{-1} \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N, \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{\Sigma(N, N-1)} = \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^N + \mathbf{S}_{\gamma\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^N \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1})^{-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N \mathbf{S}_{\beta\gamma}^{N-1}, \quad (9)$$

$$\mathbf{S}^A = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(N, N-1)} & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\gamma}^{\Sigma(N, N-1)} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha}^{\Sigma(N, N-1)} & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{\Sigma(N, N-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^A & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\gamma}^A \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha}^A & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^A \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где индекс  $A \Rightarrow \Sigma(N, N - 1)$  и введен для упрощения записи.

Последовательно (от ONT к OLT), выполняя объединение многополюсников в соответствии с выражениями (5–9) получим:

$$\mathbf{S}^B = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(A,III)} & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\mu}^{\Sigma(A,III)} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\alpha}^{\Sigma(A,III)} & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\mu}^{\Sigma(A,III)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^B & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\mu}^B \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\alpha}^B & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\mu}^B \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{S}^B = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(B,II)} & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\nu}^{\Sigma(B,II)} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\alpha}^{\Sigma(B,II)} & \vdots & \mathbf{S}_{\nu\nu}^{\Sigma(B,II)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^B & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\nu}^B \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\alpha}^B & \vdots & \mathbf{S}_{\nu\nu}^B \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{S}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(B,I)} & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha o}^{\Sigma(B,I)} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^{\Sigma(B,I)} & \vdots & \mathbf{S}_{oo}^{\Sigma(B,I)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha o}^C \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^C & \vdots & \mathbf{S}_{oo}^C \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где элементы каждой блочной матрицы определяются соотношениями (6–9) при соответствующем изменении индексов объединяемых многополюсников *PON* сети.

В результирующей матрице (13) рассеяния *PON* сети  $\mathbf{S}^C$ , ее коэффициенты определяют:  $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C$  – коэффициенты отражения и взаимной связи между элементами и типами волн (модами) на входе элементов всей сети со стороны *ONT* (обратного оптического потока);  $\mathbf{S}_{oo}^C$  – коэффициенты отражения и взаимной связи между элементами и типами волн (модами) на входе сети со стороны *OLT* (прямого оптического потока);  $\mathbf{S}_{\alpha o}^C$  – коэффициенты передачи от источника (*OLT*) к потребителям (прямого оптического потока);  $\mathbf{S}_{o\alpha}^C$  – коэффициенты передачи от *ONT* к *OLT* (обратного оптического потока).

Из (13) следует, что элементы матрицы  $\mathbf{S}^C$  определяют коэффициенты отражения  $\Gamma_o$  всей сети при прямой (от *OLT* к *ONT*) и  $\Gamma_N$  – обратной (от *ONT* к *OLT*) передаче волновых потоков:

$$\Gamma_o = \mathbf{S}_{oo}^C + (\mathbf{S}_{\alpha o}^C \mathbf{S}_{o\alpha}^C \Gamma_{ont} / (1 - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C \Gamma_{ont})), \quad (14)$$

$$\Gamma_N = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C + (\mathbf{S}_{\alpha o}^C \mathbf{S}_{o\alpha}^C \Gamma_{olt} / (1 - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C \Gamma_{olt})), \quad (15)$$

где  $\Gamma_{ont}$ ,  $\Gamma_{olt}$  – матрицы известных (паспортных) коэффициентов отражения *ONT* и *OLT*, как нагрузки оптической линии. Полагая выходы/входы *ONT* и *OLT* согласованными, т.е.  $|\Gamma_{ont}| = 0$ ,  $|\Gamma_{olt}| = 0$ , что, как правило, выполняется, не снижая общности решения, имеем

$$\Gamma_o = \mathbf{S}_{oo}^C, \quad \Gamma_N = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C. \quad (16)$$

Известно, что оптимальное в среднеквадратическом приближении решение задачи минимизации функционала  $\|\vec{x} - \vec{y}\|^2 = (\vec{x} - \vec{y}, \vec{x}^* - \vec{y}^*)$ , получают с помощью процедуры Грама – Шмидта в виде определителя блочной или окаймленной матрицы

$$\vec{y} = - \det \begin{bmatrix} \Gamma_p & \vdots & \vec{\Psi} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \mathbf{u} & \vdots & 0 \end{bmatrix} / \det \Gamma_p, \quad (17)$$

где  $\Gamma_p$  – матрица Грама;  $\vec{\Psi}$  – матрица-столбец, полностью определенного базиса заданного пространства;  $\mathbf{u}$  – матрица-строка воспроизводимого вектора  $\vec{x}$ .

Элементы квадратной матрицы  $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C$ , матрицы  $\mathbf{S}^C$  PON сети определяются соотношением  $|\mathbf{S}_{ij}^C|^2 = \mathbf{S}_{ij}^C \mathbf{S}_{ij}^{*C}$  и соответствуют элементам матрицы Грама.

Таким образом, основным условием реализации задачи повышения живучести ветви и всей сети через увеличение связности при обеспечении возможности одновременного резервирования энергетического потенциала является ортогонализация (путем коммутации) функций распределения векторов матрицы-столбца  $\mathbf{S}_{\alpha o}^C$  PON сети и выполнение условия согласования ОК-ОД с набором оптических линий, что выполнимо, т.к. выполнение равенства  $\mathbf{S}_{oo}^C = 0$  дает возможность реализовать распределение  $\vec{z}^C$  векторов матрицы-строки  $\mathbf{S}_{o\alpha}^C$  с минимальным среднеквадратичным отклонением от требуемого (оптимальным по потерям)

$$\vec{z}^C = - \det \begin{bmatrix} (|\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C|^2) & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha o}^C \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^C & \vdots & 0 \end{bmatrix} / \det (|\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C|^2). \quad (18)$$

Следовательно, решение задачи повышения живучести сети по технологии PON, возможно путем формирования нескольких оперативно изменяемых коммутируемых направлений (подключения дополнительных маршрутов), что одновременно дает возможность резервирования "энергетического бюджета" [4] при неравномерном (оптимальном) распределении коэффициентов деления (передачи) путем установки требуемых коэффициентов отражения ( $\Gamma$ ).

#### Список литературы

1. Архипов, С. Н. Алгоритм оптимизации бюджета PON сети / С. Н. Архипов, И. С. Полянский // Телекоммуникации. – Специальный выпуск. Москва, 2012. – с. 3–9.
2. Фельдштейн, А. Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ/ Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р – М.: "Связь", 1971. – 387с.
3. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
4. Бутусов, М. М. Волоконно-оптические системы передачи / Бутусов М. М., Верник С. М., Галкин С. Л. и др. Под ред. В. Н. Гомзина.: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. – 1992. – 416 с.

#### References

1. Arkhipov, S.N. Algorithm of PON Network Budget Optimization / S.N. Arkhipov, I.S. Polyansky // Telecommunications. – Special issue. Moscow, 2012. – p. 3-9.
2. Feldstein, A. L. Synthesis of quadripoles and eight-poles on microwave / Feldstein A.L., Yavich L.R. – M.: Svyaz, 1971. – 387 p.

3. Sazonov, D. M. Antennas and microwave devices: A textbook for radio specials. High schools. – М.: Higher school, 1988. – 432 p.

4. Butusov, M. M. Fiber-optical transmission systems / Butusov M. M., Vernik S. M., Galkin S. L., et al. Ed. VN Gomzin.: Textbook for universities. – М.: Radio and communication. – 1992. – 416 p.

**Александров Даниил Дмитриевич**, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации  
**Косов Егор Олегович**, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации  
**Архипов Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

**Aleksandrov Daniil Dmitrievich**, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation  
**Kosov Egor Olegovich**, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation  
**Arkhipov Sergey Nikolaevich**, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation