

References

1. Kiushov A.V. Tekhnologiya ZPT. Teoriya I praktika [Duct technology. Theory and practice]. *Lightwave RE*, 2005, no. 3, pp. 36-41.
2. Spiridonov V. N. Realnye perspektivi ispolzovaniya ZPT pri stroitelstve VOLS. [Real outlooks of use of a duct at installation of the fiber-optical cable line]. *Lightwave RE*, 2006, no. 4, pp. 28-30.
3. Pavlov A.V. Razvitiye magistralnoy tsifrovoy seti svyazi Rossiskikh Zheleznikh dorog [Development of the long-haul digital communication network of Russian Railways]. *Lightwave RE*, 2004, no. 4, pp. 21-25.
4. Osborne B., Miller W. *What To Do When Ol' Man Winter Freezes Fiber Transmission. Fiber optic cable is susceptible to freezing in a way that traditional copper cables are not.* Available at: <http://www.polywater.com/icefree3.html>. (accessed 31.01.2015).
5. Lyakhovich I.F., Rak S.M., Polyakov S.T. Zashchita kabeley ot povrezhdeniy zamerzavshay vodoy [Protection of cables against damages by the freezing water]. *Vestnik-svyazy*, 1985, no. 9, pp. 30-31.
6. Brault D., Tsellar A. Sistemy pnevmaticheskoy prokladki dlya mikrokabeleya [Systems of pneumatic installation for a microcable]. *Zhurnal setevikh resheniy LAN*, 2005, no. 5. Available at: <http://www.osp.ru/lan/2005/05/140551/>. (accessed 31.01.2015)
7. Semyonov Yu. Seti SHPD na osnove opticheskikh mikrokabeley – noviy vzglyad na gorodskuyu telefonnyu kanalizatsiyu [Broadband access networks on the basis of optical microcables – the new view on the city telephone conduit]. *Pervaya Milay*, 2008, no. 4, pp. 16-21.
8. Vorontsov A.S., Gurin O.I., Miftyakhetdinov S.Kh., eds. *Opticheskie kabeli svyazi rossiyskogo proizvodstva* (Optical cables of communication of the Russian production) Moscow, Eco-Trendz Publ., 2003. 283 p.

Received 19.12.2014

УДК 681.335

ВРЕМЯ КОММУТАЦИИ И ЕМКОСТЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА

Давыдов А.И.¹, Мухамадиев А.А.², Ураксеев М.А.²

¹Уфимский государственный университет экономики, Уфа, РФ

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ

E-mail: andrey87ufa@yandex.ru

В данной статье получены зависимости, определяющие емкость и время коммутации акустооптического коммутатора, на основе анализа свойств акустооптического дефлектора с изотропным типом дифракции.

Ключевые слова: акустооптический, коммутатор, дефлектор, емкость, время коммутации, быстродействие, разрешающая способность.

Введение

Изменение архитектуры волоконно-оптических сетей, оперативная маршрутизация в волоконно-оптических линиях связи может быть осуществлена акустооптическим коммутатором [1]. Акустооптический (АО) коммутатор служит для коммутации входного оптического волокна 1 с произвольным волокном выходного волоконно-оптического массива 2 (см. рис. 1). Входной оптический сигнал 3 передается оптическому волокну 1 и проецируется на линзу 4, коллимирующую расходящийся пучок излучения 5.

Коллимированное оптическое излучение 6 преобразуется в плоскую волну 7 поляризатором 8 и отклоняется АО дефлектором 9 на заданный угол. Генератор 10 управляет углами отклонения АО дефлектора 9 посредством управляющей линии 11. Отклоненный оптический сигнал 12 фокусируется линзой 13 в выходное оптическое волокно 14. Та-

ким образом, входной оптический сигнал 3 будет скоммутирован между оптическими волокнами 1 и 14. Если требуется связать входное оптическое волокно 1 с другим волокном волоконно-оптического массива 2, управляющие сигналы будут изменены генератором 9, и как результат будет изменен угол отклонения АО дефлектора 8 [2-4].

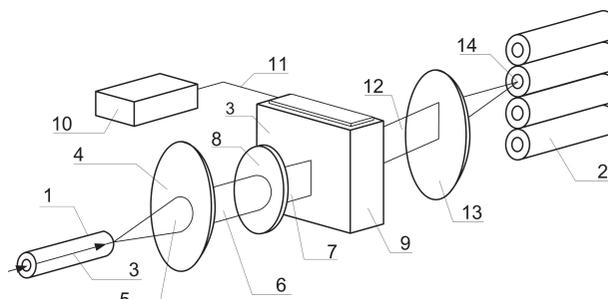


Рис. 1. Структура АО коммутатора

Существует две наиболее важные характеристики, определяющие качество оптических коммутаторов: время коммутации и емкость. Под емкостью коммутатора понимается число коммутационных каналов. Существуют коммутаторы с архитектурами $1 \times n$, $n \times n$, $m \times n$, где m и n – число коммутационных каналов.

Разрешающая способность АО дефлектора

Емкость АО коммутатора определяется разрешающей способностью дефлектора, а именно числом световых позиций, которые обеспечивает АО дефлектор при дискретном изменении частоты акустического поля.

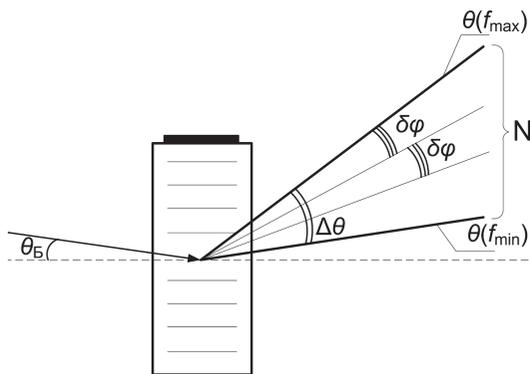


Рис. 2. Разрешение АО дефлектора

Число разрешенных пятен N (см. рис. 2) определяется отношением максимального углового диапазона $\Delta\theta$ к угловому размеру $\delta\varphi$:

$$N = \frac{\Delta\theta}{\delta\varphi}. \quad (1)$$

Максимальный угловой диапазон определяется в свою очередь рабочим диапазоном частот Δf и описывается линейной зависимостью.

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{V} \Delta f, \quad (2)$$

где λ – длина световой волны; V – скорость звука в кристалле АО дефлектора [5-6]. Выражение (2) показывает, что для управления углом достаточно изменения акустической волны. Рабочий диапазон частот Δf определяется параметрами кристалла АО дефлектора. Коллимированный пучок света 1 (см. рис. 3), проецирующийся на АО дефлектор 2 с апертурой D под углом Брэгга, отклоняется на заданный угол θ .

Дифракционная картина в результате дифракции Брэгга схожа с дифракционной картиной

Фраунгофера – дифракцией на параллельных лучах. Дифракционная картина в результате отклонения оптического пучка наблюдается на расстоянии десятка метров и более.

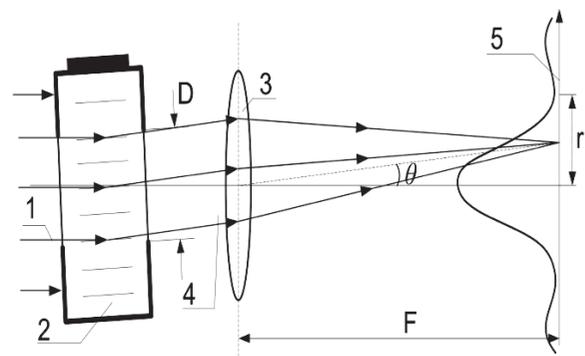


Рис. 3. Дифракционная картина и распределение интенсивности

Если на пути светового пучка, отклоненного под углом θ , поставить фокусирующую линзу 3 с фокусным расстоянием F , то отклоненный коллимированный пучок света 4 соберется в некоторой фокальной плоскости 5 без нарушения фазовых соотношений. Поэтому распределение поля в фокальной плоскости в некотором масштабе воспроизводит дифракционную картину, которую можно наблюдать в отсутствие линзы на достаточно удаленной плоскости наблюдения.

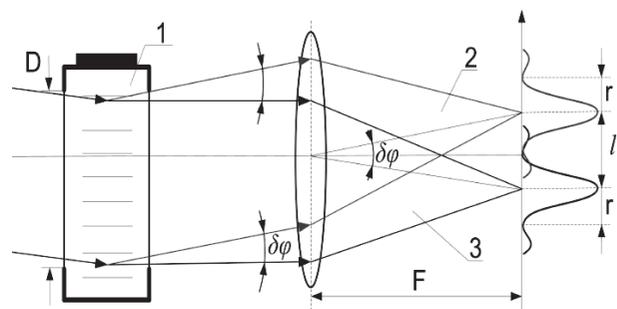


Рис. 4. Дифракционный предел разрешения АО дефлектора по Релею

В результате отклонения светового пучка АО дефлектором 2 в фокальной плоскости линзы наблюдается дифракционная картина, состоящая из центрального пятна радиуса r (диск Эйри), на который приходится 85% энергии света, и окружающих его светлых и темных колец. Радиус центрального пятна определяется выражением:

$$r = 1,22 \frac{\lambda}{D} F, \quad (3)$$

где D – апертура АО дефлектора. Для оценки разрешения акустооптического дефлектора 1 с

апертурой D используют критерий Релея (см. рис. 4), согласно которому два оптических пятна 2 и 3 будут различимы, если расстояние l между центрами будет равным или превышать радиус r диска Эйри:

$$l_{\min} = r, \quad (4)$$

где l_{\min} – минимальное расстояние между соседними оптическими пучками, разрешенными по критерию Релея:

$$l_{\min} = \delta\varphi \cdot F = 1,22 \frac{\lambda}{D} F. \quad (5)$$

Тогда угловой интервал $\delta\varphi$ будет описываться выражением:

$$\delta\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D}. \quad (6)$$

На рис. 5 изображено разрешение двух световых пятен по критерию Релея, согласно которому два пятна одинаковой интенсивности считаются разрешенными, если интенсивность света между ними составляет 81% от пика значения в центрах пятен [7-9].

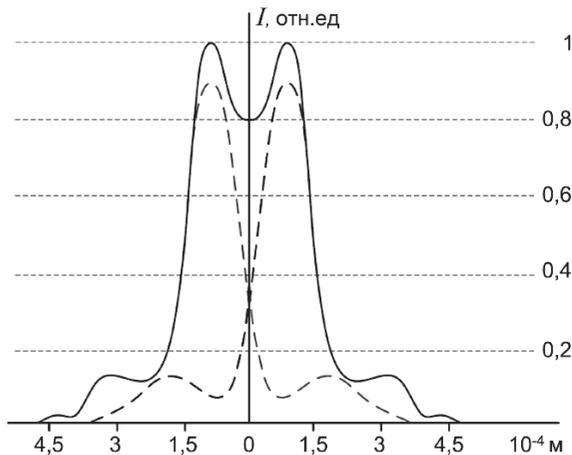


Рис. 5. Распределение интенсивности отклоненного АО дефлектором света двух разрешенных пятен по критерию Релея

Подставив (6) в (1), получим выражение, определяющее количество разрешенных точек N АО дефлектора по критерию Релея:

$$N = \frac{D}{1,22 \cdot \lambda} \Delta\theta. \quad (7)$$

Аналогично, подставив (2) в (7), получим

$$N = \frac{D}{1,22 \cdot V} \Delta f. \quad (8)$$

На рис. 6 изображена зависимость числа разрешенных точек по критерию Релея от диапазона рабочих частот Δf ($20 \cdot 10^6 \dots 50 \cdot 10^6$ Гц) и апертуры D ($66 \cdot 10^{-4} \dots 70 \cdot 10^{-4}$ м) в кристалле парателлурита АО дефлектора.

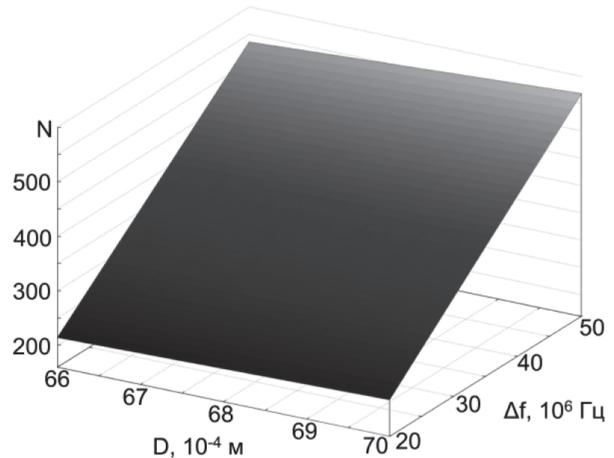


Рис. 6. График зависимости числа разрешенных точек от размера апертуры и диапазона рабочих частот

Выражение (8) и график на рис. 6 показывают, что число разрешенных точек может быть увеличено за счет расширения диапазона рабочих частот Δf и увеличения размера апертуры D . Однако приведенные величины являются фиксированными и определяются параметрами АО дефлектора [6]. Изменение рабочего диапазона и размера апертуры можно осуществить лишь путем применения АО дефлектора с другими характеристиками.

Емкость АО коммутатора

Множество точек N , отклоненных АО дефлектором 1 (см. рис. 7), сфокусированных в фокальной плоскости 2 линзой 3 и разрешенных по критерию Релея, в АО коммутаторе передаются по выходным оптическим волокнам, собранным в волоконно-оптический массив 4. Минимальное расстояние между центрами смежных волокон 5 и 6 будет равным диаметру оптического волокна, который, в свою очередь, равен диаметру перетяжки $2w_0$ сфокусированного светового пучка или удвоенному радиусу диска Эйри $2r$:

$$L_{\min} = d = 2w_0 = 2r, \quad (9)$$

где L – расстояние между осями смежных оптических волокон; d – диаметр оптического волокна; $2w_0$ – диаметр перетяжки; $2r$ – по-прежнему диаметр диска Эйри.

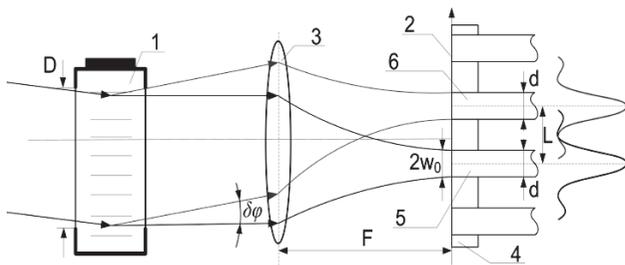


Рис. 7. Емкость АО коммутатора

Тогда емкость АО коммутатора N_f будет определяться выражением:

$$N_f = \frac{D}{2,44 \cdot V} \Delta f. \quad (10)$$

В случае применения в АО коммутаторе эффекта многолучевой дифракции Брэгга при расчете углового размера $\delta\varphi$ необходимо учитывать уровень перекрестных помех между смежными оптическими волокнами, который пропорционален следующему выражению:

$$\frac{P}{P_0} \sim \exp\left[-\left(\frac{L}{d}\right)^2\right], \quad (11)$$

где P – мощность оптического сигнала в коммутируемом оптическом волокне; P_0 – мощность оптического сигнала в смежном оптическом волокне.

Рис. 8 раскрывает зависимость изменения уровня перекрестных помех от отношения расстояния между центрами оптических волокон L к диаметру оптического волокна d [10].

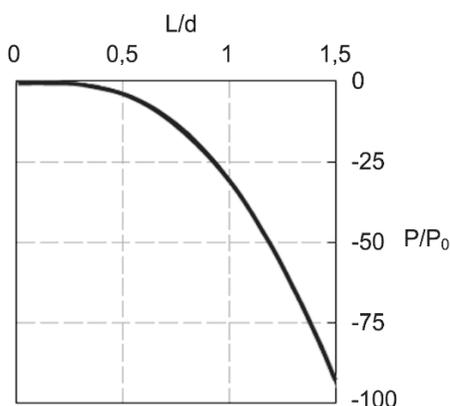


Рис. 8. График зависимости уровня перекрестных помех от относительного расстояния между оптическими волокнами

В случае применения в АО коммутаторе классической дифракции Брэгга уровень перекрестных помех не является существенной величиной, поскольку в каждый момент времени одно вход-

ное оптическое волокно соединяется с одним выходным оптическим волокном, а часть сигнала, попавшая в смежное оптическое волокно, не используется.

Время коммутации и быстродействие

Приняв размер апертуры D за расстояние, пройденное акустической волной через световое поле в поперечном направлении, а V за скорость ее распространения, получим

$$\tau = D/V, \quad (12)$$

где τ – время прохождения акустической волны через световое поле на апертуре АО дефлектора, или, иными словами, время коммутации [5-6].

Время коммутации τ определяет быстродействие акустооптического коммутатора R при дискретном изменении акустической частоты:

$$R = 1/\tau. \quad (13)$$

При дискретном выборе частоты угол отклонения оптического пучка нельзя изменить за время меньшее времени пробега акустической волны τ [5-6].

С учетом (12)-(13) выражение (8) перепишем в виде

$$N = \frac{\tau}{1,22} \Delta f = \frac{\Delta f}{1,22R}. \quad (14)$$

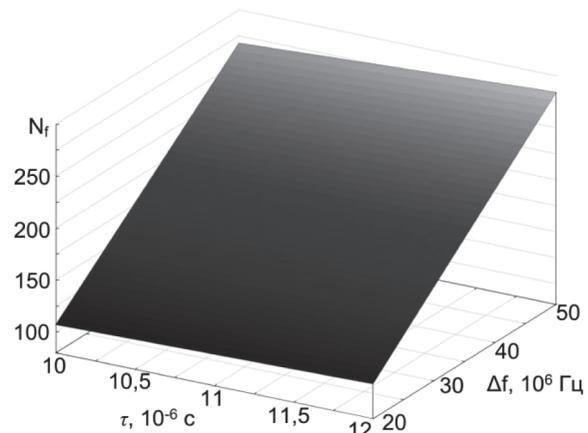


Рис. 9. Зависимость емкости коммутатора от скорости коммутации и диапазона рабочих частот

Выражение для емкости акустооптического коммутатора примет вид:

$$N_f = \frac{\tau}{2,44} \Delta f = \frac{\Delta f}{2,44R}. \quad (15)$$

Формула (15) показывает, что увеличение емкости АО коммутатора ведет к увеличению времени его переключения. Графически данная зависимость показана на рис. 9. Если на АО дефлектор проецируется оптическое излучение с гауссовым распределением, угловой размер пятна будет зависеть от степени ограничения линейной апертуры на уровне $1/e^2$. Если гауссов пучок ограничен линейной апертурой на уровне $1/e^2$ по интенсивности $D = 2w_0$, где w_0 – радиус перетяжки, угловой интервал между пятнами по критерию Релея будет определяться (8).

Если гауссов пучок не ограничивается апертурой дефлектора, $D \gg 2w_0$, угловой интервал будет равен [6]:

$$\delta\varphi_2 = 0,86\lambda / 2w_0, \quad (16)$$

а число разрешенных пятен по критерию Релея будет равно

$$N = \frac{2w_0}{0,86 \cdot V} \Delta f. \quad (17)$$

Заключение

Таким образом, емкость АО коммутатора определяется разрешающей способностью АО дефлектора, а быстродействие – временем распространения звуковой волны через апертуру АО дефлектора. Это объясняется тем, что скорость распространения оптической волны и электрические процессы генерации акустического сигнала являются несущественными по отношению к скорости распространения звука в среде. При этом рост емкости АО коммутатора влечет увеличение времени его переключения.

Литература

1. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Построение волоконно-оптической

распределенной информационно-измерительной системы с акустооптической коммутацией каналов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. Т. 9, №1, 2013. – С. 80-83.

2. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптические коммутаторы информационно-измерительных систем // Приборы. №9, 2012. – С. С. 1-7.
3. Давыдов А.И. Акустооптический коммутатор волоконно-оптических линий связи для информационно-измерительных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. №4, 2012. – С. 12-17.
4. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптическая коммутация элементов в информационно-измерительных системах // Датчики и системы. №2, 2013. – С. 33-36.
5. Korpel A. Acousto-optics – A review of fundamentals // Proceeding of the IEEE. Vol. 69, №1, 1981. – P. 48-53.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применения. М.: Сов. радио, 1978. – С. 49-59.
7. Bahaa E.A Saleh., Malvin C.T. Fundamentals of photonics. A Wiley-Interscience publication, 1991. – 947 p.
8. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М.: Наука, 1982. – 492 с.
10. Вайнер А.В., Антонов С.Н., Проклов В.В. Fiber-optic switch-multiplexer based on acousto-optic modulators. М.: Изд. ИРЭ РАН. – 4 с.

Получено 23.12.2014

Давыдов Андрей Иванович, аспирант Кафедры машин, аппаратов, приборов и технологии сервиса Уфимского государственного университета экономики, и сервиса. Тел. 8-927-330-69-11. E-mail: andrey-87ufa@yandex.ru

Мухамадиев Айдар Асхатович, к.т.н., доцент Кафедры информационно-измерительной техники (ИИТ) Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). Тел. 8-927-333-36-25. E-mail: aidar80@mail.ru

Ураксеев Марат Абдуллович, д.т.н., профессор Кафедры ИИТ УГАТУ. Тел. 8-917-381-36-76. E-mail: uma1941@mail.ru

SWITCHING TIME AND SWITCHING CAPACITY OF ACOUSTO-OPTICAL SWITCH

Davidov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A.

Acousto-optic switch can route optical signals in a branched fiber-optical network providing the input optical fiber switching to the output fiber-optic array. The principle of its work is based on light beam

diffraction by ultrasonic wave, created in optically transparent media. The refractive index of an optical medium is altered by the sound frequency. Based on the acousto-optic deflector properties analysis, expressions defining acousto-optic switch capacity and switching time are deduced. Acousto-optic switch capacity is the number of switching channels, which are determined by the acousto-optic deflector resolution, namely the number of distinct light point in space, which provides the deflector at a discrete sound frequency change. The number of distinct points is determined by maximum angular range and the Rayleigh criterion – minimum angular intervals wherein two light points will be visible. Linking resolution characteristics and acousto-optic deflector parameters we obtained that the acousto-optic switch capacity is determined by the acousto-optic deflector aperture, the sound wave velocity, and the frequency operating range. The optical signal can't be transmitted in less time than the acoustic wave travel through the solid media of the acousto-optic deflector. Therefore, the switching time is the value for which the acoustic wave passes through the optical field in the transverse direction.

Keywords: *acousto-optic, switch, deflector, capacity, time switching, operating speed, resolving power.*

Davidov Andrei Ivanovich, Postgraduate Student of Machines, Apparatus, Devices and Service Technologies Department, Ufa State University of Economics and Service, Ufa, Russian Federation. Tel. +7 927 330 69 11. E-mail: andrey87ufa@yandex.ru

Mukhamadiev Aidar Ashatovich, PhD in Technical Science, Associated Professor of Information and Management Equipment Department, Ufa State Airspace Technical University, Ufa, Russian Federation. Tel. +7 927 333 36 25. E-mail: aidar80@mail.ru

Urakseev Marat Abdullovich, Doctor of Technical Science, Professor of Information and Management Equipment Department, Ufa State Airspace Technical University, Ufa, Russian Federation. Tel. +7 917 381 36 76. E-mail: uma1941@mail.ru

References

1. Davydov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. Postroenie volokonno-opticheskoy raspredelennoj informacionno-izmeritel'noj sistemy s akustoopticheskoy kommutaciej kanalov [Construction of the fiber optical distributed information measuring system with acousto-optic channel switching]. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy*, 2013. vol. 9, no. 1, pp. 80-83.
2. Davydov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. Akustoopticheskie kommutatory informacionno-izmeritel'nyh system [Acousto-optic switches for information-measuring systems]. *Pribory*, 2012. no. 9, pp. 1-7.
3. Davydov A.I. Akustoopticheskij kommutator volokonno-opticheskijh linij svyazi dlja informacionno-izmeritel'nyh sistem [Acousto-optic switch of fiber optic lines used for information-measuring systems]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 12-17.
4. Davydov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. Akustoopticheskaja kommutacija jelementov v informacionno-izmeritel'nyh sistemah [Elements' acousto-optic switching in information-measuring systems]. *Datchiki i sistemy*, 2013, no. 2, pp. 33-36.
5. Korpel A. Acousto-optics – A review of fundamentals. *Proceeding of the IEEE*, 1981, vol. 69, no. 1, pp. 48-53.
6. Magdich L.N., Molchanov V.Ja. *Akustoopticheskie ustrojstva i ih primenenija* (Acousto-optical devices and their application) Moscow, Sov.radio Publ., 1978. 112 p.
7. Saleh Bahaa E.A., Malvin C.T. *Fundamentals of photonics*. A Wiley-Interscience publication, 1991. 947 p.
8. Matveev A.N. *Optika* (Optics). Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1985. 351 p.
9. Savel'ev I.V. *Kurs obshhej fiziki, t.2. Jelektritchestvo i magnetizm. Volny. Optika, 2-e izd., pererab.* (General physics course, vol. 2. Electricity and Magnetism. Waves. Optics, 2nd ed.) Moscow, Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1982. 492 p.
10. Vajner A.V., Antonov S.N., Proklov V.V. *Fiber-optic switch-multiplexer based on acousto-optic modulators*. Moscow, Institut radiotekhniki i jelektroniki RAN Publ. 4 p.

Received 23.12.2014