10.Calyam P., Sridharan M., Mandrawa W., Schopis P. Performance measurement and analysis of H. 323 traffic. Proceedings of the fifth International Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2004), 2004, pp. 137-146. doi: 10.1007/978-3-540-24668-8_14.

Received 07.02.2017

УДК 629.783

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Зайнуллин А.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ E-mail: zainullin.a@list.ru

Предлагается оптическая архитектура формирования диаграммы направленности, в которой используется особенность пространственного разделения многосердцевинных оптических волокон для реализации компактных оптических сетей формирования радиолуча в гибридных сетях, что является новым направлением развития многосердцевинных оптических волокон. Продемонстрирована реализация оптической системы управления четырехэлементной антенной решеткой с использованием четырехжильного многосердцевинного оптического волокна. Проведен анализ влияния многосердцевинного оптического волокна на производительность излучающей системы. Экспериментально установлены требования к уровням перекрестных помех в рассмотренной архитектуре на основе многосердцевинного оптического волокна, которые также могут способствовать деградации сигнала. Аналитически оценено потенциальное ухудшение сигнала в оптической системе формирования радиолуча, имеющее особое значения при большом количестве жил в многосердцевинных оптических волокнах.

Ключевые слова: оптические системы формирования радиолуча, многосердцевинное оптическое волокно, перекрестные помехи, оптическая задержка в реальном времени

Введение

Спутниковые системы наблюдения и провайдеры широкополосных услуг в космической области нуждаются в технологиях, способных реализовать потенциал высокоскоростной передачи больших объемов научных данных, видеоданных формата нового поколения и высокоскоростных IP подключений.

Использование фотонных подсистем в спутниках и других системах передачи данных приводит к улучшению с точки зрения пропускной способности, возможности реконфигурации, также массогабаритных показателей и энергоэффективности [1-2]. Использование функциональных свойств фотоники в телекоммуникационных системах не ограничивается распространением сигнала и его маршрутизацией внутри спутника, а также может быть использована для увеличения пропускной способности собственных радиоканалов, позволяя осуществлять широкополосные сеансы связи, увеличение скорости операций в многопользовательской среде и увеличение широты охвата покрытия связи при использовании в излучающих системах.

Электронные фазовращатели, используемые в антенных решетках для контроля угла диаграммы направленности (ДН), подвержены дрожанию луча, что, в свою очередь, ограничивает производительность системы. Избежать этого явления позволяют оптические системы формирования ДН [3-9] на основе метода временной задержки в реальном времени (PB3). Волоконная оптика хорошо приспособлена для реализации данного метода формирования ДН вследствие низких и радиочастотно-независимых оптических потерь, гибкости, невосприимчивости к электромагнитным помехам и высокой пропускной способности. К тому же фотонные системы формирования луча могут легко интегрироваться с удаленными частями антенны, что упрощает развертывание антенной решетки (AP), уменьшает перекрестные помехи и по своей природе не подвержено влиянию космической радиации.

В данной работе рассмотрены фотонные способы формирования ДН на основе оптических линий задержек [3-9]. В космической области, а также в других бортовых системах, таких как дроны и др., компактность является ключевым фактором. Продемонстрированы сверхкомпактные оптические системы формирования луча (ОСФЛ) на основе оптических кольцевых резонаторов на фотонных интегральных схемах, совместимых с процессами на комплементарных структурах металл-оксид-полупроводник [8]. Однако недостатками данного подхода являются ограничения как в диапазоне задержек, так и в радиочастотной (РЧ) ширине полосы. Гибридный подход основан на объединении PB3 и фазового управления для управления большими излучающими системами (ИС) [9]. Возможно, наконец, получить достаточно компактную ОСФЛ, основанную на принципе параллелизма, достигаемую за счет дисперсионных свойств оптического волокна, используя длинные волокна [3-6].

Современные разработки и конструктивные решения в области оптических волокон, обеспечивающие многосердцевинность волокон, могут в дальнейшем способствовать уменьшению массогабаритных показателей оптической части ОСФЛ системы. В статье обсуждается возможности многосердцевинного оптического волокна (МСВ) для дальнейшего повышения компактности фотонных структур формирования радиолуча для спутниковых и прочих платформ, где размер и вес являются ключевыми факторами.

Описание архитектуры фильтра

Основным претендентом на увеличение пропускной способности оптических линий связи дальнего радиуса действия, использующим технологию пространственного разделения каналов SDM, является МСВ. Данная технология также может использоваться для достижения максимальной компактности архитектуры оптического формирователя радиолуча в AP, в основе которой лежит волоконная дисперсия для распараллеливания формируемой временной задержки в реальном времени. Комбинация обеих технологий ведет к компактному варианту реализации формирователя радиолуча.

Предложенная схема компактного оптического формирователя луча представлена на рис. 1. Она состоит из нескольких лазеров непрерывного излучения, сигнал которых промодулирован внешним электрооптическим модулятором Maxa-Цендера. Затем матрица задержки на основе WDM-(wavelength-division multiplexing) технологии на базе многосердцевинного волокна вносит относительную задержку между оптическими несущими, которая вызвана эффектом хроматической дисперсии. В заключение WDM-сигналы демультиплексируются, поступают на фотодетектор и на излучатели AP.

Многосердцевинная дисперсионная матрица (МДМ) состоит из N-жильных волоконно-оптических сегментов, где N – число независимых оптических волокон. Оптические сегменты длиной Lсоединены между собой оптическими коммутаторами, где идет выбор дальнейшего распространения сигнала: либо сигнал вновь поступает в следующий сегмент матрицы, либо поступает напрямую в следующий коммутатор. Общая длина дисперсионного волокна уменьшается на множитель N при использовании предложенной схемы.



Рис. 2. Диаграмма направленности четырехэлементной АР, полученная из значений амплитуды и временной задержки оптической системы формирователя луча



Рис. 1. Структурная схема сети формирования ДН, включающая МДМ

ДН на рис. 2 получена на основании выполненных измерений амплитуды и временных задержек четырехканального формирователя луча для антенной решетки, элементы которой были расположены на расстоянии 0,7 λ друг от друга.

Конечное число углов перестройки луча зависит от числа различных волоконных сегментов, которые могут быть запрограммированы в МДМ. В эксперименте использовалось четырехсердцевинное волокно, показанное на рис. 3. Для сведения размеров системы к минимуму число волокон между коммутаторами должно быть степенью двух [3-4]. При использовании МСВ длина каждого волоконного сегмента остается одинаковой и равна L. Таким образом, для х-битного формирователя радиолуча число жил в волокне должно быть 2^x , то есть четырехбитному формирователю необходимо шестнадцатижильное волокно, если будет использоваться только один сегмент многосердцевинного волокна. Для увеличения числа углов поворота радиолуча может применяться комбинирование нескольких МСВ-сегментов.



Рис. 3. Рефракционная профильная шкала четырехсердцевинного волокна на длине волны 850 нм, задействованного в экспериментальной установке

Влияние многосердцевинной оптической матрицы на формирование ДН

Использование МСВ заметно влияет на ДН в двух случаях: более высокие вносимые потери по сравнению со стандартным одножильным волокном и искажения, вызванные перекрестными помехами между жилами. Перекрестные помехи между различными жилами МСВ считаются одним из ключевых параметров, который может отрицательно влиять на оптическую систему формирователя луча на основе МСВ, помехи. Принцип суперпозиции гласит, что собственные колебания линейных систем не зависят друг от друга, то есть можно возбуждать или подавлять определенный режим, не влияя на другие режимы; нет никакого рассеяния. В большинстве реальных систем, тем не менее, существует, по крайней мере, некоторое возмущение, которое вызывает перенос энергии между различными режимами. Это возмущение интерпретируется как взаимодействие между жилами МСВ и называется режимом связи между различными волокнами в той же полосе частот, или иначе, межжильные перекрестные помехи (МПП) [10-11].

Известно, что существует компромисс между величиной перекрестных помех и количеством волокон [12]. В МДМ, МПП зависят от угла перестроения, то есть демонстрирует зависимость от числа задействованных жил в МСВ, а также от близости их расположения. Максимальную величину МПП в МСВ можно наблюдать при «возбуждении» всех жил, то есть МДМ выбран угол перестроения с наибольшей временной задержкой. Влияние МПП на оптический формирователь ДН может быть уменьшено за счет надлежащего выбора последовательности задействования жил.

Например, в четырехжильном МСВ, МПП могут быть минимизированы путем соединения волокон в следующем порядке: c1, c4, c2, c3, как это показано на рис. 4*a* и рис. 4*b*. Таким образом, применяя теорию связанных мощностей [11], среднее значение перекрестных помех в каждом *i*-ом сегменте (XT_i) определяется как отношение между отрицательной и полезной оптическими мощностями и находится из формул $XT_i = P_{\text{отр } i} / P_{\text{пол } i}$. Для первого сегмента $P_{\text{отр } 1} = 0$, следовательно $XT_i = 0$. Для второго сегмента $P_{\text{отр } 2} \approx 0$, следовательно $XT_2 \approx 0$. Для третьего сегмента

$$P_{\text{orp }3} = L[h_{21}(P_1 - P_{2c}) + h_{24}(P_4 - P_{2c})] + P_{\text{orp }2},$$

где $P_1 = P_0 e^{-\alpha L}$. После подстановки в предыдущее выражение получаем

$$\begin{split} P_{\text{orp }3} &= L \Big[h_{21} P_0 e^{-\alpha L} + h_{24} P_0 e^{-2\alpha L} \Big] \approx \\ &\approx L h P_0 e^{-\alpha L} \Big(1 + e^{-\alpha L} \Big) \,. \end{split}$$

Следовательно

$$XT_{3} = \frac{P_{\text{orp } 3}}{P_{\text{пол } 3}} = \frac{LhP_{0}e^{-\alpha L}(1+e^{-\alpha L})}{P_{0}e^{-3\alpha L}} = Lh(1+e^{-\alpha L})e^{2\alpha L}.$$

Для четвертого сегмента

$$\begin{split} P_{\text{orp } 4} &= L \big[h_{31} \big(P_1 - P_{3c} \big) + h_{32} \big(P_2 - P_{3c} \big) + \\ &+ h_{34} \big(P_4 - P_{3c} \big) \big] + P_{\text{orp } 3}. \end{split}$$

«Инфокоммуникационные технологии» Том 15, № 2, 2017, с. 156-163

Аналогично получаем

$$XT_3 = 2Lh(1+e^{-\alpha L})e^{3\alpha L},$$

где L – длина МСВ, α – коэффициент ослабления мощности, включающий вносимые потери от оптической 3*D*-муфты ввода / вывода (соединительной муфты fan in / fan out), и *h* – коэффициент связи по мощности между соседними волокнами. Предполагая, что однородные волокна имеют большой радиус изгиба, коэффициент связи по мощности определяется следующим выражением [11; 13]:

$$h \approx k^2 S_f(0), \tag{1}$$

где k – это коэффициент связанных мод между соседними волокнами и S_f – это спектральная плотность мощности структурных колебаний в МСВ.





от числа сегментов (подключенных волокон)

Рис. 4 демонстрирует численную оценку среднего значения МПП как функцию от количества сегментов (жил, используемых для передачи информации) в четырехжильном оптическом волокне (см. рис. 4b) при рассмотрении различных радиусов изгиба RB в выражении (1) и параметрах волокна: L = 150 м, $k \approx 0,0072$ м⁻¹ и $\alpha = (0,44 + 4,4/0.15)$ дБ/км, где 4,4 дБ это вносимые потери от оптической 3*D*-муфты ввода/вывода. Как можно видеть, перекрестные помехи возрастают, когда задействуется больше волоконных сегментов. К тому же MCB с большим числом волокон, что приведет к увеличению массы, будет подвержено дополнительным МПП.

Оптическое затухание на 3D-муфтах ввода и вывода является ключевым фактором, ограничивающим максимальное число сегментов в МСВ. В литературе были описаны различные способы реализации устройств ввода и вывода, включая следующие: объемная оптика (включающая наборы линз и призм), волоконные устройства вывода расслоенного типа (структуры склеенных одномодовых волокон), специальные капилляры (системы, содержащие одномодовые волокна, сваренные с мультискважными капиллярами), оптические волокна с двойным покрытием (выделенные оптические волокна с внешней и внутренней оболочкой, имеющими различные показатели преломления) и конический МСВ коннектор. Конические МСВ коннекторы продемонстрировали затухание на уровне 0,38 дБ [14]. Столь низкий уровень вносимых потерь делает актуальной тщательную оценку МПП. Оценивая уровень МПП, на рис. 4с можно увидеть, что чем меньше радиус изгиба R_{R} , тем меньше уровень МПП во всех случаях. Для системы формирования ДН этот факт является преимуществом, так как волокно должно быть упаковано наиболее компактным образом, принимая во внимание компромисс между уменьшением перекрестных помех и потерей на макроизгибах. Суммарная величина перекрестных помех системы формирования ДН будет определяться величиной МПП и аккумулированных перекрестных помех оптических коммутаторов (которые зависят от технологии коммутации).

Суммарные перекрестные помехи вносят пороговый уровень BER для передачи данных – этот эффект вкупе с вносимыми потерями оптического формирователя ДН сформирует верхнюю границу масштабируемости оптических многосердцевинных схем формирователей ДН с точки зрения числа углов перестроения [15].

Дисбаланс диаграммы направленности из-за вносимых потерь МСВ

Многосердцевинное волокно, как правило, обладает более высокими показателями вносимых потерь, чем стандартное волокно, вследствие сложности прохождения света в местах соединения различных волокон (в нашем случае величина составляет 2,2 дБ на каждый вход/выход). Вносимые потери в МСВ пропорциональны числу жил в волокне. Это, в свою очередь, вносит дисбаланс амплитуд между углами перестроения, как показано на рис. 5, где не учитывается дисбаланс в оптических коммутаторах. На рис. 5 видно, что существует линейная связь между длиной волокна (числом задействованных волокон в МСВ) и дисбалансом мощности.

Хотя в предложенной архитектуре (см. рис. 1) число излучающих элементов зависит только от количества оптических несущих, количество позиций поворота луча строго зависит от вносимых потерь MCB (как показано на рис. 6). Это затухание может быть компенсировано путем внесения пропорционального затухания на соответствующем проходном патчкорде (но в счет повышения вносимых потерь формирователя ДН) или частично компенсировано за счет динамической регулировки амплитуды оптических несущих с помощью оптических усилителей (которые могут быть достаточно дорогостоящими для больших решеток). Таким образом, оптимизация вносимых потерь МСВ является критической точкой для использования в больших оптических системах формирования луча.



Рис. 5. Изменение оптической мощности в зависимости от положения угла поворота радиолуча для четырехбитной оптической системы формирования луча для различных вносимых потерь MCB: №1 – 2 дБ, №2 – 1 дБ, №3 – 0.5 дБ



Рис. 6. Максимальный дисбаланс оптической мощности в зависимости от числа углов поворота (число дискретов оптической системы формирования луча) для различных вносимых потерь МСВ: №1 – 2 дБ, №2 – 1 дБ, №3 – 0.5 дБ

Заключение

Многосердцевинное волокно представляет собой естественный подход к повышению компактности и масштабируемости оптических сетей формирования радиолуча с возможностью применения в гибридных системах и других платформах, где важными являются массо-габаритные показатели. Инновационное применение многосердцевинного волокна в составе МДМ демонстрирует лучшие показатели компактности дисперсионных элементов (то есть оптические волоконные сегменты) за счет количества жил в МСВ. Данное преимущество достигается за счет некоторых ограничений, которые вносит МСВ. Было показано, что основные ограничения в масштабируемости оптических формирователей ДН на основе МСВ обусловлены затуханиями на муфтовых соединениях (fan in / fan out) и межканальными перекрестными помехами, оказывающими второстепенное влияние. Новое применение МСВ будет иметь лучшие показатели при дальнейшей оптимизации взаимосвязи жил между собой (сокращение потерь мощности в местах соединения), а также разработке оптических кабелей с большим числом волокон и уменьшенным значением межволоконных перекрестных помех.

Данное исследование выполнено при поддержке Стипендии Президента РФ на обучение за рубежом на 2015-16 гг. (Приказ № 558 от 03.06.2015).

Литература

- Aveline M., Sotom M., Barbaste R. e.a. Reconfigurable microwave photonic repeater for broadband telecom missions: Concepts and technologies // International Conference on Space Optics, 2014. – P. 1-8.
- Vidal B., Mengual T., Martí J. Fast Optical Beamforming Architectures for Satellite-based Applications // Advances in Optical Technologies. Vol. 2012. – P. 1-5.
- Frankel M.Y., Esman R.D. True time-delay fiber-optic control of an ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 43, No. 9, 1995. – P. 2387-2394.
- Tong D.T.K., Ming C.W. A novel multiwavelength optically controlled phased array antenna with programmable dispersion matrix // IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 8, No. 6, 1996. – P. 812- 814.

- Vidal B., Madrid D., Corral, J.L. e.a. Novel Photonic True-Time Delay Beamformer based on the Free Spectral Range Periodicity of Arrayed Waveguide Gratings and Fiber Dispersion // IEEE Photonic Technology Letters. Vol. 14, No. 11, 2002. – P. 1614-1616.
- Piqueras M.A., Grosskopf G., Vidal B. e.a. Optically Beam formed Beam-Switched Adaptive Antennas for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Networks // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 54, No. 2, 2006. – P. 887-899.
- Drummond M.V., Monteiro P.P., Nogueira R.N. Photonic true-time delay beamforming based on polarization-domain interferometers // Journal of Lightwave Technology. Vol. 28, No. 17, 2010. – P. 2492-2498.
- Meijerink A., Roeloffzen C.G.H., Meijerink R. e.a. Novel ring resonator-based integrated photonic beam former for broadband phased array receive antennas. Part I: Design and performance analysis // Journal of Lightwave Technology. Vol. 28, No 1, 2010. – P. 3-18.
- Vidal B., Mengual T., Ibáñez-López C. e.a. Optical Beamforming Network based on Fiber Optical Delay Lines and Spatial Light Modulators for Large Antenna Arrays // IEEE Photonics

Technology Letters. Vol. 18, No. 24, 2006. – P. 2590-2592.

- 10. Macho A., Morant M., Llorente R. Experimental evaluation of nonlinear crosstalk in multi-core fiber // Optics Express. Vol. 23, No. 14, 2015. – P. 18712-18720.
- 11. Macho A., Morant M., Llorente R. Unified model of linear and nonlinear crosstalk in multi-core fiber // Journal of Lightwave Technology. Vol. 34, No. 13, 2016. – P. 3035-3046.
- 12. Saitoh K., Matsuo S. Multicore Fiber Tech-nology // Journal of Lightwave Technology. Vol. 34, No. 1, 2016. – P. 55-66.
- 13.Koshiba M., Saitoh K., Takenaga K. e.a. Multicore fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory // Optics Express. Vol. 19, No. 26, 2011. – P. B102-B111.
- 14.Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F. e.a. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network // Optics Express. Vol. 18, No. 11, 2010. – P. 11117-11122.
- 15.Blumenthal D.J., Granestrand P., Thylen L. BER floors due to heterodyne coherent crosstalk in space photonic switches for WDM networks // IEEE Photonic Technology Letters. Vol. 8, No. 2, 1996. – P. 284-286.

Получено 13.03.2017

Зайнуллин Айрат Радикович, аспирант Кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел. 8-917-341-34-36. E-mail: zainullin.a@list.ru

BEAMFORMING METHOD DEVELOPMENT FOR BROADCASTING SYSTEM IN DATA TRANSMISSION HYBRID NETWORKS

Zainullin A.R.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation E-mail: zainullin.a@list.ru

Multicore fiber has been one of the main innovations in fiber optics in the last decade. Reported work on multicore fiber has been focused on increasing the transmission capacity of optical communication links by exploiting space-division multiplexing. Additionally, multicore fiber presents a strong potential in optical beamforming networks. The use of multicore fiber can increase the compactness of the broadband antenna array controller. This is of utmost importance in platforms where size and weight are critical parameters such as communications satellites and airplanes. Here, an optical beamforming networks in hybrid networks is proposed, being a new application field for multicore fiber. The experimental demonstration of this system using a 4-core multicore fiber that controls a four-element antenna array is reported. An analysis of the impact of multicore fiber on the performance of antenna arrays is presented. The analysis indicates that the main limitation comes from the relatively high insertion loss in the multicore fiber fan-in and fan-out devices, which leads to angle dependent losses that can be mitigated by using fixed optical attenuators or a photonic lantern to reduce multicore fiber insertion loss. The crosstalk requirements are also experimentally evaluated for the

proposed multicore fiber-based architecture. The potential signal impairment in the beamforming network is analytically evaluated, being of special importance when multicore fiber with a large number of cores is considered. Finally, the optimization of the proposed multicore fiber-based beamforming network is addressed targeting the scalability to large arrays in data transmission hybrid networks.

Keywords: optical beamforming, multicore fiber, crosstalk, true time delay

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.2.08

Zainullin Airat Radikovich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marks str., Ufa 450000, Russian Federation; PhD Student of the Department of Telecommunication systems. Tel.: +79173413436. E-mail: zainullin.a@list.ru.

References

- 1. Aveline M., Sotom M., Barbaste R., Benazet B., Le-Kernec A., Magnaval J., Ginestet P., Navasquillo O., Piqueras M.A. Reconfigurable microwave photonic repeater for broadband telecom missions: Concepts and technologies. *International Conference on Space Optics*, 2014, pp. 1–8.
- 2. Vidal B., Mengual T., Martí J. Fast Optical Beamforming Architectures for Satellite-based Applications. *Advances in Optical Technologies*, 2012, vol. 2012, pp. 1–5. doi: 10.1155/2012/385409.
- 3. Frankel M.Y., Esman R.D. True time-delay fiber-optic control of an ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, vol. 43, no. 9, pp. 2387–2394. doi: 10.1109/22.414593.
- 4. Tong D.T.K., Ming C.W. A novel multiwavelength optically controlled phased array antenna with programmable dispersion matrix. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, vol. 8, no. 6, pp. 812–814. doi: 10.1109/68.502103.
- Vidal B., Madrid D., Corral J.L., Martí J. Novel Photonic True-Time Delay Beamformer based on the Free Spectral Range Periodicity of Arrayed Waveguide Gratings and Fiber Dispersion. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2002, vol. 14, no. 11, pp. 1614–1616. doi: 10.1109/LPT.2002.803323.
- Piqueras M.A., Grosskopf G., Vidal B., Herrera J., Sanchis P., Polo V., Corral J.L., Marceaux A., Galière J., Lopez J., Enard A., Valard J.L., Parillaud O., Estèbe E., Vodjdani N., den Besten J.H., Soares F., Smit M.K., Marti J. Optically Beamformed Beam-Switched Adaptive Antennas for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Networks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 887–899. doi: 10.1109/TMTT.2005.863049.
- Drummond M.V., Monteiro P.P., Nogueira R.N. Photonic true-time delay beamforming based on polarization-domain interferometers. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 17, pp. 2492– 2498. doi: 10.1109/JLT.2010.2057408.
- Meijerink A., Roeloffzen C.G.H., Meijerink R., Zhuang L., Marpaung D.A.I., Bentum M.J., Burla M., Verpoorte J., Jorna P., Hulzinga A., Van Etten W. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas—Part I: Design and performance analysis. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no 1, pp. 3–18. doi: 10.1109/JLT.2009.2029705.
- Vidal B., Mengual T., Ibáñez-López C., Martí J. Optical Beamforming Network based on Fiber Optical Delay Lines and Spatial Light Modulators for Large Antenna Arrays. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, vol. 18, no. 24, pp. 2590–2592. doi: 10.1109/LPT.2006.887347.
- 10. Macho A., Morant M., Llorente R. Experimental evaluation of nonlinear crosstalk in multicore fiber. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 14, pp. 18712–18720. doi: 10.1364/OE.23.018712.
- 11. Macho A., Morant M., Llorente R. Unified model of linear and nonlinear crosstalk in multicore fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 13, pp. 3035–3046.
- 12. Saitoh K., Matsuo S. Multicore Fiber Technology. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 55–66. doi: 10.1109/JLT.2015.2466444.
- 13. Koshiba M., Saitoh K., Takenaga K., Matsuo S. Multicore fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 26, pp. B102–B111. doi: 10.1364/OE.19.00B102.
- Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F., Fini J.M., Fishteyn M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 11, pp. 11117–11122. doi: 10.1364/OE.18.011117.

 Blumenthal D.J., Granestrand P., Thylen L. BER floors due to heterodyne coherent crosstalk in space photonic switches for WDM networks. *IEEE Photonic Technology Letters*, 1996, vol. 8, no. 2, pp. 284–286. doi: 10.1109/68.484268.

Received 13.03.2017

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.7; 621.39

ОЦЕНКА МАСШТАБИРУЕМОСТИ ЗАДЕРЖКИ ПКС-КОНТРОЛЛЕРА НА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Карташевский В.Г.¹, Галич С.В.², Семёнов Е.С.², Кирьянова Н.И.² ¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ ²Волгоградский государственный университет, Волгоград, РФ *E-mail: kartash@psati.ru*

В данной статье авторами рассматриваются метрики и закономерности параллельных вычислений применительно к оценке масштабирования задержки контроллера программно-конфигурируемых сетей. Проанализирован закон Амдала для многоядерных центральных процессоров, поддерживающих распараллеливание на уровне потоков, и определены его области применимости. Проведены экспериментальные исследования масштабирования задержки контроллера программно-конфигурируемых сетей OpenDaylight на параллельной вычислительной системе, снабженной процессором Intel Xeon. В результате была выявлена тенденция к росту доли линейного кода при увеличении числа ядер центрального процессора. Данное явление ограничивает рост ускорения на параллельной вычислительной системе. Сделан вывод о том, что активация технологии распараллеливания потоков Нурег-Threading позволяет снизить задержку контроллера OpenDaylight и повысить эффективность использования процессора сервера. Результаты исследования могут быть полезны сетевым инженерам, администрирующим контроллеры программно-конфигурируемых сетей, а также программистам, разрабатывающим программное обеспечение для данного контроллера.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, ПКС-контроллер, OpenDaylight, задержка, многоядерный процессор, распараллеливание на уровне потоков, масштабирование, ускорение, закон Амдала

Введение

Внедрение в эксплуатацию сетей, реализующих идеологию разделения уровня управления трафиком от уровня передачи данных, получившей название программно-конфигурируемые сети (ПКС), порождает вопросы соблюдения оператором установленных норм функционирования IP-сетей [1-4]. Существует ряд работ [5-9], показывающих наличие зависимости параметров производительности сети в целом от производительности единого центра управления сетью, называемого в рамках данной концепции ПКСконтроллером и представляющего собой программно-аппаратную платформу на базе сервера общего назначения, использующего центральные процессоры (ЦП) архитектуры х86. В архитектуру современных ЦП положена идея параллельных вычислений: процессоры снабжаются несколькими вычислительными ядрами, а каждое ядро может обеспечить параллелизм на уровнях инструкций, обработки данных и потоков [10]. В случае необходимости увеличения производительности аппаратной платформы эксплуатируемого ПКСконтроллера системный администратор может активировать технологию распараллеливания на уровне потоков, которая в случае процессоров Intel именуется Hyper-Threading, либо осуществить замену ЦП на модель с большим числом вычислительных ядер. Однако перед принятием таким мер необходимо убедиться в том, что эффект будет положительный для конкретного приложения [11-12]. В рамках данной статьи авторами рассматривается задача по выявлению закономерностей, позволяющих оценить масштабирование задержки ПКС-контроллера на параллельной вычислительной системе.

Метрики и закономерности параллельных вычислений

Для оценки работы программы на параллельной вычислительной системе часто используют такие метрики параллелизма, как ускорение и