

СПОСОБ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АНТЕННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ROF С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА И МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЕГО ПАРАМЕТРОВ

А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова, И.К. Мешков, А.В. Андрианова,
Г.И. Абдрахманова, А.А. Ишмияров, Л.З. Янтилина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия

Аннотация

Рассматривается задача подключения антенной решётки радиоизлучения к волоконно-оптической линии системы Radio-over-Fiber для широкополосного сигнала. Для устранения частотно-пространственной зависимости диаграммы направленности предложено включить излучатели антенной решётки через разработанное оптическое устройство, разветвляющее оптические сигналы в соответствии с заданными частотными полосами. Разработана методика расчёта структуры электромагнитного поля внутри рабочего тела предложенного оптического устройства. Установлено, что показатель преломления оптической рабочей области должен иметь требуемое 3D-распределение. Намечен подход к обеспечению заданного свойства.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, Radio-over-Fiber, волоконно-оптический смеситель, интерференционная картина, 3D-распределение показателя преломления.

Цитирование: Султанов, А.Х. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчёта его параметров / А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова, И.К. Мешков, А.В. Андрианова, Г.И. Абдрахманова, А.А. Ишмияров, Л.З. Янтилина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 728-737. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737.

Введение

Технология широкополосной (ШП) передачи «Радио по оптоволокну» (RoF – Radio-over-Fiber, радиотракт в диапазоне $\sim 3 \div 11$ ГГц [1]) представляется одной из перспективных технологий для абонентских сегментов доступа, а также представляет интерес при построении специальных приложений, например, создании радиоудлинителя ГЛОНАСС и т.д. Кроме широкой полосы пропускания, базовыми преимуществами RoF являются: аппаратная миниатюрность компонентов, что объясняется применением аналоговой передачи сигналов, а значит, отсутствием схем преобразования и обработки цифровых сигналов, а также значительная скрытность ввиду весьма малой мощности радиосигналов ($\sim -50 \dots -55$ дБм), что обусловлено необходимостью соответствия установленной спектральной маске [1] для ШП-радиолиний. Однако это же качество является и недостатком RoF – дальность радиопередачи остаётся небольшой (неск. десятков метров), что существенно ограничивает применимость таких систем.

Увеличить длину ШП-радиолинии RoF можно с применением антенной решётки (АР) направленного радиоизлучения [2] вместо отдельных ненаправленных излучателей. Это же позволит увеличить и адаптивность сегментов RoF, что обладает большой актуальностью и является одним из координирующих направлений при построении сетей категории 5G.

Однако возникает вопрос о подведении сигналов и управлении антенной решёткой – применение электронных компонентов нежелательно ввиду их сложности и значительных размеров (по сравнению с оптическими), учитывая специфику рассматриваемого радиодиапазона. Кроме того, системы RoF классически строятся с преимущественным оптическим управлением: электронными СВЧ-компонентами яв-

ляются только фотодиод, усилитель и сама антенна. Одной из основных сложностей в построении направленной радиолинии с АР в диапазоне частот RoF является обеспечение заданной формы диаграммы направленности (ДН) с учётом широкополосности излучения. Последнее определяется не только широкополосностью отдельного излучателя, например, представленного в [3], но и способом построения самой АР, в частности, выбором расстояния между излучателями d , что существенно сказывается на ДН [4]. Так, в частности, если параметр d выбирается из условия $d \leq \Lambda_1/2$ [4], где Λ_1 – длина волны радиоизлучения, соответствующая частоте $f_1 = 4$ ГГц, то для $f_2 = 8$ ГГц и соответственного уменьшения Λ_2 указанное условие уже не будет выполняться, что значительно изменит форму ДН, делая её на отдельных пространственных сегментах «цветной» (рис. 1). Указанное крайне нежелательно с точки зрения как передачи, так и обеспечения электромагнитной совместимости и скрытности излучения.

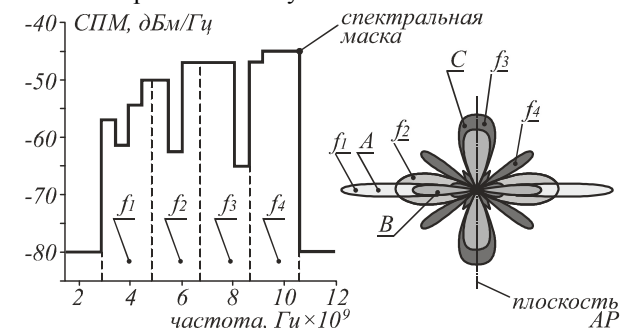


Рис. 1. Пример ДН в ШП; в точке А излучение присутствует только на частоте f_1 , в точке В – на всех частотах, в точке С – паразитное излучение на частоте f_3 , которого там быть не должно

В известных работах, например в [5–7 и др.], направленных на изучение возможности построения АР

для RoF, не рассматривается проблема устранения «цветности» ДН, а предлагается использовать только узкую часть диапазона, для которой указанная проблема ещё не возникает. Это, безусловно, улучшает свойства ДН, но существенно снижает информационную ёмкость сигнала и скорость передачи информации, практически сводя на нет достоинства ШП-RoF. Компенсация данных факторов в опубликованных работах достигается за счёт применения нескольких оптических несущих, каждой из которых отводится отдельный радиодиапазон, что неизбежно требует выделения дополнительного λ -ресурса оптической линии и, соответственно, является проблематичным для большинства абонентских сетей, а также не позволяет работать на сегменте RoF единым передатчиком, ограничивая применение таких решений для задач специальных приложений связи.

Цель настоящего исследования заключается в разработке способа подключения широкополосных антенных излучателей в состав антенной решётки, позволяющего снизить эффект частотно-пространственной зависимости диаграммы направленности, реализуемого с применением устройства оптической линии, и проведении оценки технических параметров данного устройства.

Предлагается добиться этого с применением интерференционного волоконно-оптического разветвителя, содержащего профилированный оптический смеситель в качестве рабочего тела. Представляется целесообразным также исследовать методы расчёта пространственной интерференционной картины в смесителе и выработать приемлемую с технической точки зрения методику расчёта. Это позволит уточнить технические параметры последнего и предложить подход к его реализации.

1. Способ подключения антенных излучателей с применением оптического устройства

Для выравнивания пространственно-частотной характеристики AP предлагается в составе решётки использовать большее число излучателей, чем требуется для создания заданных направленных свойств радиолинии, а запитывание их производить не идентично, а с разделением на частотные поддиапазоны (вдоль направления y , рис. 2). При этом излучатели каждого поддиапазона следует размещать с выполнением условия:

$$d_k \cong \Lambda_k / 2, \tag{1}$$

где Λ_k соответствует центральной радиочастоте поддиапазона f_k .

Такой способ подключения элементов AP обеспечит однонаправленность ДН для всего ШП-сигнала, а для выполнения задачи отклонения лепестка решётка должна быть выполнена не линейной, а плоской (рис. 2). Это обеспечивает подведение сигналов на каждую серию излучателей, подключенных на основании условия (1), с последовательным сдвигом фазы (вдоль направления x), от которого и будет зависеть расположение лепестка ДН [4].

Представленный способ подключения излучателей AP предполагает использование сложного оптического компонента в световодной линии RoF. Последний должен обеспечивать «вырезание» частотных диапазонов из оптического ШП-сигнала, разветвление полученных оптических сигналов с коэффициентом разделения не менее 50 (а на практике – существенно больше) для формирования эффективной AP и при необходимости (если световодная линия RoF составляет порядка неск. десятков километров) – компенсирование приобретенных в линии искажений сигнала. Для этой цели предлагается использовать волоконно-оптический интерференционный разветвитель с профилированным смесителем [8], отличающийся от [8] применением легированного (например, эрбием, для усиления излучения в диапазоне 1550 нм) материала для изготовления смесителя (рис. 3) и наличием пьезоэлектрической матрицы (ПМ) в области дополнительных световодов.

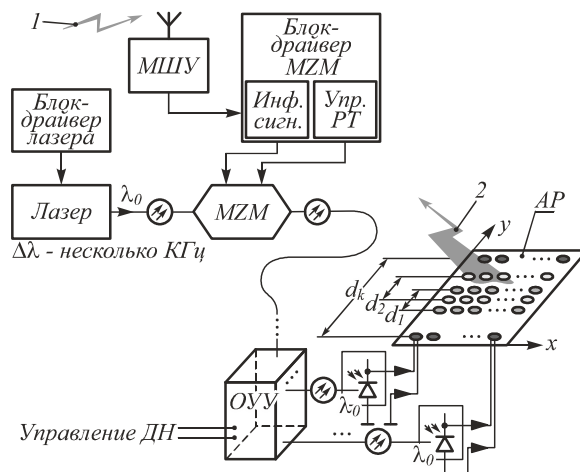


Рис. 2. Схема линии передачи для ШП-RoF с излучающей AP; 1 – излучение на входе линии, принимаемое системой передачи; 2 – направленное излучение, создаваемое AP; МШУ – малошумящий усилитель; MZM – модулятор Маха–Цендера; ОУУ – оптическое устройство управления

Устройство по рис. 3 обеспечивает подключение значительного числа (до ~200) выходных световодов за счёт использования смесителя с расширяющимися торцевыми частями [8], усиление сигнала при подаче излучения накачки по световоду 2 за счёт применения легированного материала, а также интерференционное выделение (вырезание) спектральных полос $\Delta\lambda_k$ из ШП-сигнала шириной, определяющейся добротностью резонатора Фабри–Перо, образованного торцами 6 и 7.

Следует заметить, что торцы 6 и 7 составлены из торцов световодов, которые расположены со смещением по осевому направлению друг относительно друга и выставлены с соблюдением следующих условий по расстояниям [8] (рис. 3):

$$l_{0,k} = m(\lambda_k / n_0), \tag{2}$$

где λ_k – центральные оптические длины волн спектральных полос $\Delta\lambda_k$, n_0 – усреднённое по объёму значение коэффициента преломления материала смесителя, m – порядок интерференционной картины, опреде-

ляющийся из аналогичного соотношения $l_0 = m(\lambda_0/n_0)$, в котором λ_0 – центральная длина волны передачи сигнала, а l_0 – расстояние между торцами 6 и 7 по осевой линии смесителя.

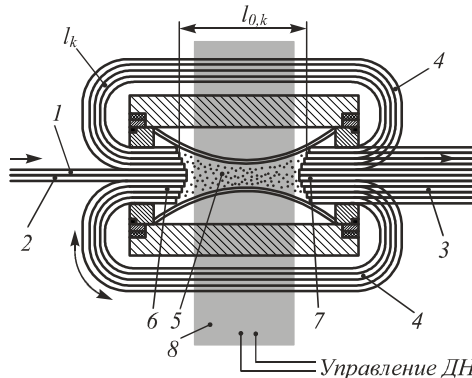


Рис. 3. Конструкция оптического устройства управления оптическим сигналом для AP в RoF; 1 – входной световод; 2 – световод для подачи излучения накачки в смеситель; 3 – выходные и 4 – дополнительные световоды; 5 – смеситель; 6 и 7 – входные и выходные торцы смесителя, один из которых может быть выполнен плоским, и 8 – пьезоэлектрическая матрица

Использование ПМ, на пьезоэлементах которой избирательно закреплены дополнительные световоды ОУУ (рис. 3), позволяет изменять длину участков дополнительных световодов, изменяя соответственно и набег фаз сигналов, распространяющихся в них. Это обеспечивает задержку сигналов, подаваемых на AP, что и приводит к отклонению лепестка ДН.

Для того, чтобы торцы смесителя 6 и 7 обеспечили интерференцию типа Фабри–Перо, а также была достигнута однородность отражения, они сначала покрываются отражающим материалом, а затем отполированные торцы световодов (входных, выходных и дополнительных) приклеиваются к таким торцам смесителя. Толщина покрытия должна быть меньше половины длины волны излучения. Чтобы обеспечить приемлемую засветку смесителя, излучение подаётся не по единственному световоду, а по световодному жгуту с плотным размещением световодов. Для увеличения процентного содержания «излучающей» площади торца жгута перед его сборкой оптическая оболочка каждого из используемых световодов частично стачивается. С целью повышения размерной стабильности смесителя может быть использована обратная оптическая связь (например, при задействовании одного из дополнительных световодов), что позволит осуществлять контроль устройства в режиме реального времени. Кроме того, смеситель следует располагать на электронном стабилизаторе температуры, основанном на элементе Пельтье, а его внешние защитные оболочки должны обладать демпфирующими свойствами.

2. Постановка задачи моделирования

Для эффективного расчёта оптического интерференционного устройства управления для AP-RoF необходимо выполнить моделирование структуры элек-

тромагнитного поля в смесителе (рис. 4), который является наиболее сложным элементом ОУУ, что позволит уточнить его конструктивные параметры по отношению к оценкам, представленным в [8].

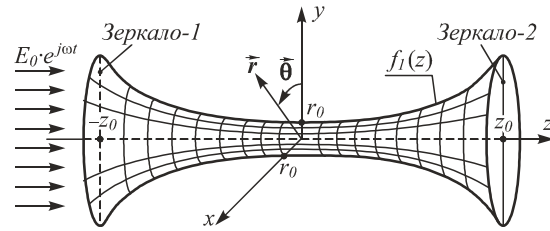


Рис. 4. Иллюстрация смесителя, являющегося рабочей областью ОУУ; зеркало 1 соответствует торцу 6, а зеркало 2 – торцу 7 на рис. 3 соответственно

Ставится задача нахождения напряжённости электрической составляющей поля световой волны $E(r, z, t)$ либо её Фурье-образа $\tilde{E}(r, z, \omega)$ для $r_2 < f_1(z)$, $z \in [-z_0, z_0]$ с относительной погрешностью $\epsilon \leq 10\%$. Эффекты на зеркалах и на поверхности профиля смесителя допускается не рассматривать. Считать, что профиль является телом вращения, т.е. $x^2 + y^2 = r^2 = f_1(z)$, и не зависит от θ , $f_1(z)$ – гладкая, монотонная. Показатель преломления внутри смесителя может не быть однородным, т.е. определяться как: $n(r, z) = f_2(r)$ либо $n(r, z) = f_3(r, z)$ для $r_2 < f_1(z)$ для заданного значения ω . Показатель преломления вне смесителя $n(r, z) = n_{об}$ для $r^2 < f_1(z)$. Коэффициент отражения от торцов ρ_T может быть представлен через так называемый эффективный показатель преломления на торцах $n(r, -z_0) = n(r, z_0) = n_0^*$ и рассчитываться из соотношения [9]:

$$n_0^* = \frac{1 + \rho_T}{1 - \rho_T} \text{ для } r^2 < f_1(-z_0) \text{ и } r^2 < f_1(z_0), \quad (3)$$

что физически обусловлено различием коэффициентов преломления материала смесителя и внешней среды в районе его торцов.

Геометрические параметры примем на основании оценок, представленных в [8]: $z_0 \in [20, 200]$ мкм, $r_0 \in [2, 15]$ мкм. Пусть на вход смесителя поступает непрерывная волна $E_0 \times \exp(j\omega t)$ с $\omega \in [10 \cdot 10^{14}, 15 \cdot 10^{14}]$ рад/с, которая соответствует длинам волн около $\lambda_0 = 1550$ нм.

В рамках представленной задачи ставится подзадача о нахождении $E(r, z, t)$ либо $\tilde{E}(r, z, \omega)$ в случае, если профиль обладает отражением с коэффициентом отражения: $\rho_{II} = (f_2 - 1)/(f_2 + 1)$ или $\rho_{II} = (f_3 - 1)/(f_3 + 1)$ для $r^2 = f_1(z)$. Кроме этого, хотя бы одно из зеркал смесителя, например, второе, является «сложным», для которого $r^2 = f_4(z)$, $z \in [z_0 - (v\lambda_0/2), z_0 + (v\lambda_0/2)]$; v – коэффициент заглубленности торца (зеркала) (рис. 5). На торец может быть нанесено отражающее покрытие, тогда $n(r, z) = f_5(z)$ для $r^2 < f_1(z)$ и $r = f_4(z)$.

3. Методы и результаты моделирования

«Прямой» подход к получению пространственной интерференционной картины в профильном смесителе,

основанный на конечно-разностном численном решении уравнения Гельмгольца, представленного в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\tilde{E}(r_{i+1}, z, \omega) - 2\tilde{E}(r_i, z, \omega) + \tilde{E}(r_{i-1}, z, \omega)}{h_r^2} + \\ & + \frac{\tilde{E}(r, z_{i+1}, \omega) - 2\tilde{E}(r, z_i, \omega) + \tilde{E}(r, z_{i-1}, \omega)}{h_z^2} + \\ & + n^2(r, z, \omega) \cdot \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \tilde{E}(r, z, \omega) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

даёт результат, представленный на рис. 6а. Расчёт мощности оптического излучения $M(r, z, \omega)$ проведён для следующих параметров смесителя и излучения: $f_1(z) = \chi_1 z^2 + \chi_2 r_0^2$, $r_0 = 7$ мкм, $\omega = \omega_0 = 12,2 \cdot 10^{14}$ рад/с ($\lambda_0 = 1,55$ мкм); $E_0 = 2,1 \cdot 10^5$ В/м (соответствует 10 мВт в световоде типа SMF-28); материал смесителя был принят однородным: $f_2(r) = 1,52 = n_{сеп}$ и $n_0^* = 9$ ($\rho_T = 0,8$), $n_{об} = 1,48$, что соответствует среде преломления $n_{сеп}$ и $n_{об}$ для SMF-28; $f_4(z) = 1$. Коэффициенты χ_1 и χ_2 , определяющие в данном случае f_1 и фактически заглублённость профиля, были приняты: $\chi_1 = 7,1 \cdot 10^{-3}$ и $\chi_2 = 1$. Их значения определялись подбором, исходя из получающейся структуры поля – должен был сохраняться одноименный режим распространения в смесителе. Параметр M рассчитывался исходя из следующего соотношения: $M(r, z, T) = [\dot{E}(r, z, T) \cdot \dot{E}^*(r, z, T)] / 2Z_B$, где $\dot{E}(r, z, T)$ – комплекснозначная функция, характеризующая электрическую напряжённость поля световой волны, определяющаяся из $\tilde{E}(r, z, \omega)$ методом обратного преобразования Фурье с использованием замены переменных $T = (t - z \times \beta_1) / T_0$ с целью перехода во временную шкалу, связанную с сигналом; T_0 – эффективная длительность входного сигнала; $\dot{E}^*(r, z, T)$ – комплексно сопряжённая функция для $\dot{E}(r, z, T)$; Z_B – волновое сопротивление среды, в расчётах принято $Z_B = 120\pi$ Ом.

Оценка погрешности счёта проведена путём сравнения с аналогичными значениями в центре смесителя (по оси z), полученными для классического интерферометра Фабри–Перо (ИФП) с параметрами $f_1(z) = r_0 = 7$ и $z_0 = 46$ мкм:

$$E(0, z_0, T) = \frac{1 - \rho_T}{1 - \rho_T \cdot \exp\left(j \frac{8\pi n_{сеп} z_0}{\lambda}\right)} E_0 \cdot \exp(j\omega T). \quad (5)$$

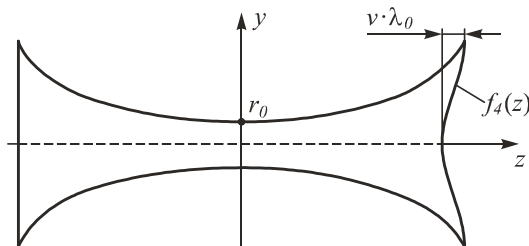


Рис. 5. Иллюстрация смесителя со «сложным» вторым зеркалом

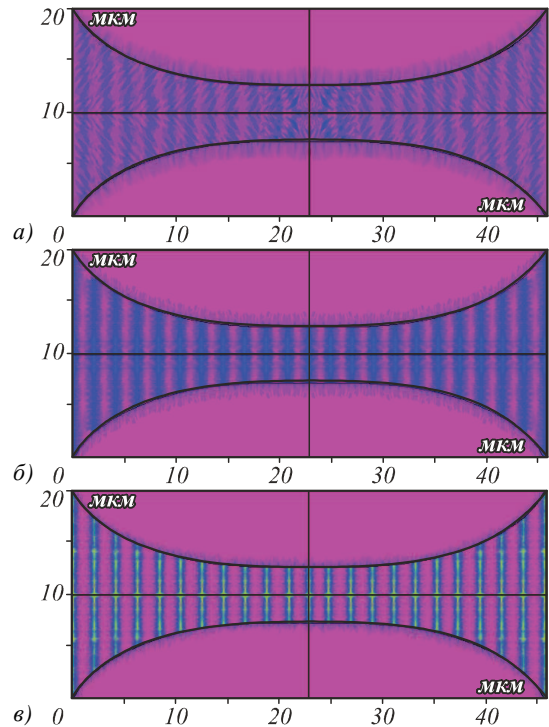


Рис. 6. Результаты расчёта структуры электромагнитного поля в коротком симметричном смесителе с шагом $\Delta z = 10$ нм: метод А или «прямой» метод (а); метод Б (б) и метод С.1 (в)

В центральной области смесителя ввиду параллельности зеркал отличие интерференционной картины профильного и классического ИФП не должно возникать. Наибольшая погрешность вычислений составила: $\epsilon \leq 6,4\%$.

Метод расчёта в соответствии с (4) полезен для анализа структуры поля в коротких (длиной до ~ 50 мкм) смесителях. Но при увеличении длины последних решение расходится (рис. 7).

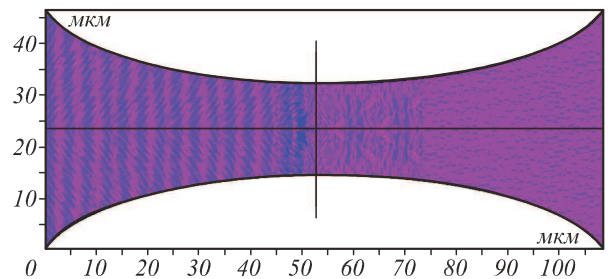


Рис. 7. Иллюстрация расходящегося решения, основанного на конечно-разностном интегрировании дифференциального уравнения 2-го порядка (4)

Следовательно, для расчёта поля в практически значимых смесителях с длиной порядка 200 мкм уравнение (4) следует упрощать. По аналогии с [10] предложено упростить уравнение Гельмгольца путём пренебрежения вторыми производными от амплитуд волн по координате z , представлении показателя преломления n через коэффициент фазы β : $\beta = n(\omega/c)$, где c – скорость света в вакууме, а также разложении функции β в степенной ряд по степеням $(\omega - \omega_0)$ и рассмотрении только первых двух членов β_0 (харак-

теризующий входное излучение и приблизительно равный $2\pi/\lambda_0$) и β_1 (характеризующий значение групповой скорости сигнала в смесителе [10]), и дополнительном алгебраическом упрощении вида $n^2 = (n_0 + \Delta n)^2 \approx n_0^2 + 2n_0\Delta n$. Предложено также решение для $\tilde{E}(\omega, r, z)$ искать в виде произведения «продольной» $\tilde{A}(\omega, z)$ и «поперечной» $\tilde{F}(\omega, \mathbf{r})$ составляющих, причём из-за наличия интерференционной структуры следует представить $\tilde{E}(\omega, r, z)$, а точнее – её составляющую $\tilde{A}(\omega, z)$ в виде суммы встречно движущихся волн. Для случая, когда профиль можно считать неотражающим ($\rho_{\Pi} \leq 0,2$), поиск решения осуществлялся в виде плоских встречных волн, что и представляло собой метод Б:

$$\tilde{E}^q(r, z, \omega) = \tilde{F}^q(\mathbf{r}, \omega) \cdot \exp(-j\beta_r^q r) \times \times [\tilde{A}_f(z, \omega) \cdot \exp(j\beta z) + \tilde{A}_b(z, \omega) \cdot \exp(-j\beta z)], \quad (6)$$

где \tilde{A}_f и \tilde{A}_b – Фурье-образы продольных амплитудных составляющих волн, идущих вперёд и назад в смесителе; $\tilde{F}^q(\mathbf{r}, \omega)$ – эффективное радиальное распределение амплитудной составляющей поля на каждой ступеньке Δz для (рис. 8а); q – номер «короткого» резонатора, $q \in [1, Q]$; $\beta_r^q = (\pi \cdot n(r, \Delta z \cdot q)) / (2\sqrt{f_1(\Delta z \cdot q)})$ – коэффициенты фаз соответствующих волн. Эффективное радиальное распределение поля определялось модифицированным методом Гаусса [11], где:

$$\tilde{F}^q(r, \omega) = \tilde{F}(r, z_q, \omega) = \frac{1}{J_0(U(\omega))} \cdot J_0\left(U(\omega) \cdot \frac{r}{\sqrt{f_1(\Delta z \cdot q)}}\right), \quad (7)$$

для $r^2 < f_1(\Delta z \cdot q)$, где $U(\omega)$ – обобщённый параметр, характеризующий распространение излучения с учётом показателя преломления среды смесителя-резонатора, в данном случае рассчитывался как $U(\omega) = (\omega/c)r \times n(r, z, \omega)$; J_0 – функция Бесселя первого рода. Соотношение (7) представлено не как векторное, а как скалярное, что объясняется допустимостью рассматривать плоскую картинку из-за круговой (азимутальной) симметрии смесителя и целесообразностью рассмотрения только таких решений, при которых происходит одномодовое распространение поля в смесителе.

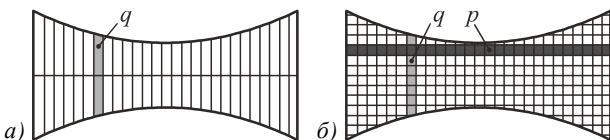


Рис. 8. Иллюстрация принципа разбиения: на «короткие» резонаторы (а), на «короткие и узкие» резонаторы (б)

Соотношения для продольно распространяющегося поля в смесителе, полученные в результате упрощения уравнения Гельмгольца, имеют вид:

$$\frac{d\tilde{A}_f(z, \omega)}{dz} = j(\beta - \beta_q) \cdot \tilde{A}_f(z, \omega) + \mathfrak{R}_q \cdot |\tilde{A}_b(z, \omega)| \text{ и} \\ - \frac{d\tilde{A}_b(z, \omega)}{dz} = j(\beta - \beta_q) \cdot \tilde{A}_b(z, \omega) + \mathfrak{R}_q \cdot |\tilde{A}_f(z, \omega)| \quad (8)$$

на каждой ступеньке Δz , где

$$\beta_q = \frac{\pi}{|z_{q+1} - z_q|} \cdot \left[\frac{f_1(z_q)}{f_1(z_0)} \right]^2 \cdot n(r, z_q),$$

а коэффициент связи \mathfrak{R}_q определялся как:

$$\mathfrak{R}_q = \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |n^2(r, z_q) - \langle n^2(r, z_q) \rangle| \cdot |F^q(r, T)|^2 dr}{\int_{-\infty}^{\infty} |F^q(r, T)|^2 dr}.$$

$F^q(r, T)$ находился из (7) методом обратного преобразования Фурье. Уравнения (8) решались методом конечных разностей с применением ЭВМ.

На рис. 6б представлен результат расчёта стоячих волн в смесителе-резонаторе методом Б для $Q = 10$ и $T_0 = 10^{-6}$ с (значения других параметров были приняты прежними) для неизменного коэффициента преломления материала смесителя.

Для того, чтобы исследовать значимость отражения от профиля, предложено было решение искать в виде конических встречных волн:

$$\tilde{E}^q(r, z, \omega) = [\tilde{F}_+^q(r, \omega) \cdot \exp(j\beta_r^q r) + \tilde{F}_-^q(r, \omega) \cdot \exp(-j\beta_r^q r)] \times \times [\tilde{A}_f(z, \omega) \cdot \exp(j\beta z) + \tilde{A}_b(z, \omega) \cdot \exp(-j\beta z)], \quad (9)$$

а систему уравнений (8) дополнить уравнениями, составленными по аналогии с методикой, представленной в [10], что представляло собой метод С.1:

$$\frac{d^2 \tilde{F}_+^q(r, \omega)}{dr^2} = j(\beta - \beta_r^q) \tilde{F}_+^q(r, \omega) + \mathfrak{R}_q \cdot |\tilde{F}_-^q(r, \omega)| \text{ и} \\ - \frac{d^2 \tilde{F}_-^q(r, \omega)}{dr^2} = j(\beta - \beta_r^q) \tilde{F}_-^q(r, \omega) + \mathfrak{R}_q \cdot |\tilde{F}_+^q(r, \omega)|. \quad (10)$$

Разбиение прозрачной области смесителя при проведении вычислений по-прежнему производилось в соответствии с рис. 8а.

В результате расчёта величины M методом С.1 для короткого смесителя (с длиной 46 мкм) с параметрами, представленными выше, было установлено следующее: гребни стоячей волны существенно перекашиваются при увеличении коэффициента отражения от профиля ρ_{Π} . Уже при $\rho_{\Pi} \geq 0,18$ отклонение гребней стоячей волны от прямой линии (оцениваемое по СКО) превысило 7%, и лишь при $\rho_{\Pi} < 0,08$ получены практически прямые (с отклонением не более 2%) гребни (рис. 6в). Кроме того, расчёты методом С.1 в отличие от расчётов «прямым» методом и методом Б, показали, что вершины гребней являются многопиковыми (рис. 9), что, вообще говоря, хорошо согласуется с результатами, полученными «лучевым» методом

при анализе пространственной интерференционной картины в профилированном интерферометре Фабри–Перо с учётом отражения от профиля [12, 13].

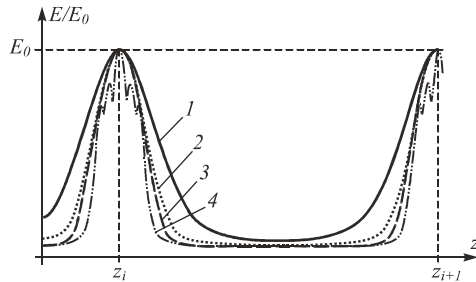


Рис. 9. Иллюстрация результатов расчёта мощности поля по оси смесителя представленными выше методами: 1 – «прямой метод»; 2 – метод Б; 3 – «лучевой» метод [12, 13] и 4 – метод С.1

На основании проведённых вычислений был сделан вывод о том, что для исследования поля в длинных смесителях следует применять метод С.1. Кроме того, ввиду желательности для практических приложений получения плоских гребней стоячей волны в смесителе-резонаторе, расположенных перпендикулярно оси последнего, коэффициент преломления смесителя n не должен быть однородным. Учитывая также сложный характер построения зеркал резонатора (рис. 3), коэффициент n , скорее всего, должен изменяться не только по r , но и по z . Функция $n(r, z)$ может быть определена в результате решения обратной задачи – при заданных расположении гребней стоячей волны и параметрах смесителя, включая требуемый ρ_{Π} .

Для расчёта мощности поля в длинном смесителе со сложным вторым зеркалом было предложено соотношение (9) представить в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{E}^{q,p}(r, z, \omega) = & \left[\tilde{F}_+^{q,p}(r, \omega) \cdot \exp(j\beta_r^{q,p} r) + \right. \\ & \left. + \tilde{F}_-^{q,p}(r, \omega) \cdot \exp(-j\beta_r^{q,p} r) \right] \times \\ & \times \left[\tilde{A}_r(z, \omega) \cdot \exp(j\beta z) + \right. \\ & \left. + \tilde{A}_b(z, \omega) \cdot \exp(-j(\beta - B(z_{q,p}))z) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

и рассматривать процесс распространения встречных волн в «коротких и узких» резонаторах (рис. 8б), что представляло собой метод С.2. В (11) обозначено:

$$\beta_r^{q,p} = \frac{\pi \cdot n(r_p, z_q)}{2\sqrt{f_1(z_q)}}, \quad B(z_{q,p}) = \frac{\pi n(r_p, z_q)}{2z_0 + z_p},$$

$Z_p = f_4^{-1}(\Delta r \times p)$, $p \in [1, P]$, $v = 1$, $\Delta r = 10$ нм. Для расчётов были использованы уравнения (8) с коэффициентами

$$\beta_{q,p} = \frac{\pi}{|z_{q+1} - z_q|} \cdot \left[\frac{f_1(z_q)}{f_1(z_0)} \right]^2 \cdot n(r_p, z_q) \text{ и уравнения (10).}$$

Для упрощения счёта коэффициенты \mathfrak{K}_q использовались прежними.

На рис. 10 представлены результаты счёта методами С.1 и С.2, проведённого с привлечением модулей про-

граммы [14]. При проведении расчётов были использованы значения: $\rho_r = 0,8$; $Q = 80$; $f_1(z) = \chi_1 z^{1,6} + r_0^2$. При получении форм, представленных на рис. 10а, б, отражение профиля было установлено $\rho_{\Pi} = 0,08$, что позволило определиться со значением r_0 и χ_1 для случая однородного преломления в смесителе. Было получено наибольшее значение r_0 , при котором поле в области второго зеркала смесителя ещё практически не формируется в виде нескольких концентрических форм, которое составило $\sim 39,8$ мкм; при этом коэффициент χ_1 оказался равным $8,4 \cdot 10^{-2}$ (коэффициент $\chi_2 = 1$). При расчёте картины поля в длинном смесителе со сложным вторым зеркалом с функцией $f_4(z) = |r| = 1,43(z - z_0)^{3,31}$, подобранной на основании геометрических параметров световодного жгута, и параметрами $z_0^* = 200$ мкм, $z_0 = 205$ мкм, $P = 30$ было установлено, что даже для слабо отражающего профиля гребни стоячей волны существенно перекашиваются начиная практически с середины смесителя (по оси z), а в области второго зеркала всё смешивается и наступает хаос. Подбор параметров системы, при котором коэффициент преломления материала смесителя продолжал оставаться неизменным, не позволил получить сколько-нибудь выраженную интерференционную картину, при которой наблюдались бы отдельно расположенные и не пересекающиеся гребни. Это привело к необходимости выполнения подбора функции $n(r, z)$, обеспечивающей получение таких отдельно расположенных гребней. Так, на рис. 10в представлен результат расчёта поля методом С.2, полученный после выполнения предварительного подбора объёмного характера изменения показателя преломления (рис. 11), при условии заметного ($\rho_{\Pi} = 0,3$) отражения от профиля.

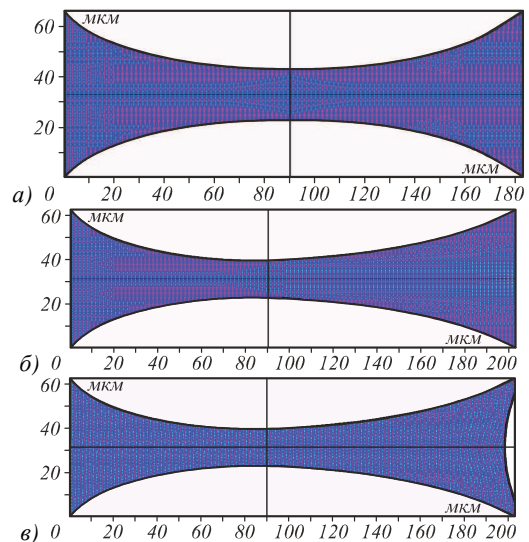


Рис. 10. Результаты счёта для длинных смесителей: метод С.1 и $\chi_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (а); метод С.1; по результатам счёта видно, что имеет место преобладание единственного концентрического пучка, $\chi_1 = 8,4 \cdot 10^{-2}$ (б); метод С.2, применённый к материалу смесителя с объёмным характером изменения показателя преломления, представленного на рис. 11 (в)

Видно, что для получения практически значимого оптического элемента для устройства управления антенной решёткой в RoF требуется обеспечить реализацию сложного объёмного 3D-распределения коэффициента преломления смесителя с учётом профильности последнего. Современные технологии получения оптических элементов с градиентом показателя, основанные на применении сложного легирования материала, позволяют, как правило, решать задачу 2D-распределения, из чего следует необходимость привлечения нового подхода к получению таких оптических сред. Для этой цели пред-

ставляется целесообразным изучить возможность применения объёмного 3D-нанокристаллического оптического материала, выполненного с объёмной неравномерностью наноструктурной обработки. Возможно, что подобная обработка по отношению к заготовке с соответствующим образом подобранным изначальным 2D-распределением n за счёт легирования или смешивания близких составов материала позволит получить требуемый оптический элемент. Для контролирования параметров заготовки может применяться, например, масс-спектроанализирующая приборная база.

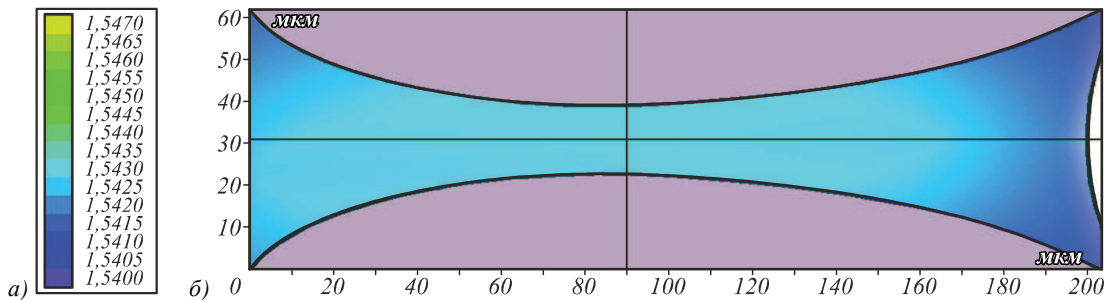


Рис. 11. Иллюстрация функции преломления $n(r, z)$, полученной численным подбором, представленная в цветовом формате: шкала для значений показателя преломления (а) и результат расчёта $n(r, z)$ (б)

Заключение

В работе обозначена задача подключения радиоизлучающих элементов в антенную решётку для широкополосных сигналов, представляющих интерес в системах Radio-over-Fiber. Для устранения эффекта частотно-пространственной зависимости диаграммы направленности решётки предложено в оптической линии RoF использовать интерференционный волоконно-оптический разветвитель, содержащий профилированный оптический смеситель в качестве рабочего тела устройства. Устранение эффекта достигается за счёт разделения оптических сигналов заданных спектральных диапазонов и соответствующего подведения их к радиоизлучающим элементам. Последние следует располагать на расстояниях друг от друга, определяемых из условия остронаправленной ДН для каждого из частотных диапазонов.

Для уточнения параметров наиболее сложного элемента рассматриваемого оптического устройства – оптического смесителя исследованы методы расчёта пространственной интерференционной картины, устанавливающейся между его торцами. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных численным интегрированием уравнения 2-го порядка (Гельмгольца, метод А), а также системы уравнений, полученных в результате упрощения последнего и представления искомого решения в виде произведения продольной и поперечной компонент (методы Б и С). Установлено, что методом А может быть получена интерференционная картина в небольших по длине смесителях (до ~50 мкм). Для исследования смесителей, имеющих практическую значимость с длиной порядка 200 мкм, следует пользоваться методами Б и С.

Установлено также, что в смесителях со «сложным» (искривленным) торцом (зеркалом) и неизменным коэффициентом преломления по всему объёму интерференционная картина в области выходного торца необратимо нарушается. Восстановить структуру последней удаётся при использовании объёмного 3D-распределения преломления смесителя, полученного в результате численного решения обратной задачи – нахождения указанного распределения, при котором наблюдаются отдельно расположенные гребни стоячей электромагнитной волны в смесителе-резонаторе с пересекающимися порядками интерференции. Для изготовления данного оптического тела предложено исследовать возможность применения объёмной наноструктурной обработки к получаемой путём легирования 2D-заготовке.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0058. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0058.

Литература

1. Лазоренко, О.В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы 1. Основные понятия, модели и методы описания [Электронный ресурс] / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор. – 2008. – URL: http://pselab.ru/Books/Lazorenko_RFRA_2008_13_2.pdf (дата обращения 19.11.2015).
2. Багманов, В.Х. Моделирование СШП радиоимпульсов на основе производных Гаусса и Рэлея с учётом спектральной маски ГКРЧ / В.Х. Багманов, И.К. Мешков, Е.П. Грахова, И.Л. Виноградова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 3. – С. 62-68. – ISSN 1999-5458.
3. Абдрахманова, Г.И. Фрактальная сверхширокополосная антенна на основе кругового монополя / Г.И. Аб-

- драхманова [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/6/text.pdf> (дата обращения 15.10.2015).
4. **Кочержевский, Г.Н.** Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский. – М.: Радио и связь, 2008. – 280 с.
 5. **Zhuang, L.** Separate Carrier Tuning Scheme for Integrated Optical Delay Lines in Photonic Beamformers / L. Zhuang, C.G.H. Roeloffzen, A. Leinse, M. Hoekman, R. Heideman // IEEE. – 2011. – P. 65-68.
 6. **Vidal, B.** Fast Optical Beamforming Architectures for Satellite-Based Applications / B. Vidal, T. Mengual, J. Martı́ // Advances in Optical Technologies. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-5. – ISSN 1687-6407.
 7. **Burla, M.** Multiwavelength-Integrated Optical Beamformer Based on Wavelength Division Multiplexing / M. Burla, D.A.I. Marpaung, L. Zhuang, M.R. Khan, A. Leinse, W. Beeker, M. Hoekman, R.G. Heideman, C.G.H. Roeloffzen // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32(20). – P. 3509-3520. – ISSN 0733-8724.
 8. **Sultanov, A.Kh.** The fiber optic device for signal positive chirping by interferential method with tuning of chirp size / A.Kh. Sultanov, I.L. Vinogradova, I.K. Meshkov, T.R. Nizamov, R.Y. Chirikov // Optical Technologies for Telecommunications, Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9533. – P. 953309-1-953309-8.
 9. **Матвеев, А.Н.** Оптика / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
 10. **Agrawal, G.P.** Nonlinear fiber optics / G.P. Agrawal. – Boston: Academic Press, 2001. – 466 p.
 11. **Андреев, В.А.** Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи / В.А. Андреев, А.В. Бурдин. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.
 12. **Султанов, А.Х.** Подход к комплексному моделированию профилированного интерферометра типа Фабри-Перо, обеспечивающего переключение оптических сигналов / А.Х. Султанов, А.И. Салихов, И.Л. Виноградова // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 30, № 1. – С. 172-179.
 13. **Виноградова, И.Л.** Характеристики двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо / И.Л. Виноградова // Радиотехника. – 2002. – № 6. – С. 33-37.
 14. **Султанов, А.Х.** Программа расчёта амплитуды выходного сигнала волоконно-оптического телекоммуникационного устройства / А.Х. Султанов, В.И. Канаков, И.Л. Виноградова. – Свидетельство о регистрации программы №50200400159 от 2004. Бюл. № 1.
- scription [In Russian]. Source: (http://pselab.ru/Books/Lazorenko_RFRA_2008_13_2.pdf).
- [2] Bagmanov VH, Meshkov IK, Grahova EP, Vinogradova IL. UWB radio pulses design based on the Gaussian and Rayleigh derivative pulses relevant to the spectral mask of Radio Frequencies Committee [In Russian]. Electrical and Information Facilities and Systems 2014; 10(3): 62-8.
 - [3] Abdrakhmanova GI. Fractal ultra wide band antenna based on circle monopole [In Russian]. Source: (<http://jre.cplire.ru/jre/aug13/6/text.pdf>).
 - [4] Korchejevsky GN. Antenna feeder devices [In Russian]. Moscow: Radio i Sviaz Publisher; 2008.
 - [5] Zhuang L, Roeloffzen CGH, Leinse A, Hoekman M, Heideman R. Separate Carrier Tuning Scheme for Integrated Optical Delay Lines in Photonic Beamformers. IEEE 2011; 65-8.
 - [6] Vidal B, Mengual T, Martı́ J. Fast Optical Beamforming Architectures for Satellite-Based Applications. Advances in Optical Technologies 2012; 2012: 1-5. DOI:10.1155/2012/385409
 - [7] Burla M, Marpaung DAI, Zhuang L, Khan MR, Leinse A, Beeker W, Hoekman M, Heideman RG, Roeloffzen CGH. Multiwavelength-Integrated Optical Beamformer Based on Wavelength Division Multiplexing. Journal of Lightwave Technology 2014; 32(20): 3509-20.
 - [8] Sultanov AKh, Vinogradova IL, Meshkov IK, Nizamov TR, Chirikov RY. The fiber optic device for signal positive chirping by interferential method with tuning of chirp size. Optical Technologies for Telecommunications, Proceedings of SPIE 2015; 9533: 953309-01-953309-8. DOI:10.1117/12.2179981.
 - [9] Matveev AN. Optics [In Russian]. Moscow: Visshaia Shkola Publisher; 1985.
 - [10] Agrawal GP. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press; 2001.
 - [11] Andreev VA, Burdine AV. Multimode optical fibers. Theory and applications of high-speed networks [In Russian]. Moscow: Radio i Sviaz Publisher; 2004.
 - [12] Sultanov AKh, Salikhov AI, Vinogradova IL. Approach to complex modeling of shaped Fabry-Perot interferometer, providing switching of optical signals [In Russian]. Herald of USATU 2009; 30(1): 172-9.
 - [13] Vinogradova IL. Parameters of double Fabry-Perot resonator [In Russian]. Radio Engineering 2002; 6: 33-7.
 - [14] Sultanov AKh, Kanakov VI, Vinogradova IL. Program for Calculating the Amplitude of the Output Signal of the Fiber Optic Telecommunications Device [In Russian]. Certificate RF of the program registration N50200400159 of 2004, Russian Bull of Inventions N1, 2004.

References

- [1] Lazorenko OV. Ultra Wide Band Signals and physical processes 1. Basic concepts, models and methods of de-

A METHOD FOR CONNECTING ANTENNA RADIATORS TO ROF SYSTEMS USING AN OPTICAL DEVICE AND CALCULATING ITS PARAMETERS

A.Kh. Sultanov, I.L. Vinogradova, I.K. Meshkov, A.V. Andrianova, G.I. Abdrakhmanova, A.A. Ishmiyarov, L.Z. Yantilina
Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education
"Ufa State Aviation Technical University", Ufa, Russia

Abstract

It is proposed that a special optical device be used to connect the radio antenna array to a Radio-over-Fiber light guide line, which provides splitting optical signals into predetermined frequency bands. The field calculation within the device active region is done.

Keywords: broadband signal, Radio-over-Fiber, fiber optic mixer interference pattern, 3D-refractive index distribution.

Citation: Sultanov AKh, Vinogradova IL, Meshkov IK, Andrianova AV, Abdrakhmanova GI, Ishmiyarov AA, Yantilina LZ. A method for connecting antenna radiators to RoF systems using an optical device and calculating its parameters. Computer Optics 2015; 39(5): 728-37. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, the grant agreement No. 14.574.21.0058. The unique project identifier – RFMEFI57414X0058.

Сведения об авторах

Султанов Альберт Ханович, 1950 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1973 году окончил Новосибирский электротехнический институт связи (НЭИС, ныне – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики – СибГУТИ) по специальности «Многоканальная электросвязь», работает заведующим кафедрой телекоммуникационных систем в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ). Область научных интересов: полупроводниковая и антенная техника, оптика, связь, обработка изображений.

E-mail: tk_s@ugatu.ac.ru.

Albert Khanovich Sultanov (b. 1950), Doctor of Technical Science, Professor, graduated from Novosibirsk Electrotechnical Institute of Telecommunications in 1973 (presently – Siberia State University of Telecommunications and Informatics), majoring in «Multichannel Electrocommunication». Currently he is the Head of Telecommunication Systems department in Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests include semiconductor and antenna techniques, optics, communication and image processing.

Виноградова Ирина Леонидовна, 1970 года рождения, доктор технических наук, доцент, в 1992 году окончила Уфимский авиационный институт (УАИ, ныне – Уфимский государственный авиационный технический университет – УГАТУ) по специальности «Информационно-измерительная техника», работает ведущим научным сотрудником на кафедре телекоммуникационных систем в УГАТУ. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, математическая обработка сигналов, широкополосные системы передачи, антенная техника.

E-mail: vil-4@mail.ru.

Irina Leonidovna Vinogradova (b. 1970), Doctor of Technical Science, Assistant Professor, graduated from Ufa Aviation Institute in 1992 (presently – Ufa State Aviation Technical University), majoring in «Information and Measuring Equipment». She works as the lead researcher at the Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests are currently focused on fiber optics, telecommunications systems, mathematical signal processing, broadband transmission systems, antenna technology.

Мешков Иван Константинович, 1985 года рождения, кандидат технических наук, доцент, в 2007 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает старшим научным сотрудником на кафедре телекоммуникационных систем в УГАТУ. Область научных интересов: обработка сигналов, спутниковые данные, обработка цифровых сигналов.

E-mail: mik.ivan@bk.ru.

Ivan Konstantinovich Meshkov (b. 1985), Candidate of Technical Science, Assistant Professor, received Eng. Deg. in 2007 in Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television from Ufa State Aviation Technical University. He works as the senior researcher at the Telecommunication Systems department in USATU. His research interests include signal processing, satellite data processing, digital signal processing.

Андрианова Анна Владимировна, 1990 года рождения, в 2012 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы», работает заведующим лабораториями на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, сверхширокополосные системы передачи.

E-mail: annette210590@gmail.com.

Anna Vladimirovna Andrianova (b. 1990) received Eng. Deg. in 2012 in Multichannel Telecommunication Systems from Ufa State Aviation Technical University. Currently she is the head of laboratories of Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests include fiber optics, telecommunication systems, ultra wideband systems.

Абдрахманова Гузель Идрисовна, 1988 года рождения, кандидат технических наук, в 2010 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы», работает старшим научным сотрудником на кафедре телекоммуникационных систем в УГАТУ. Область научных интересов: сверхширокополосные системы передачи, антенная техника, волоконная оптика, телекоммуникационные системы, математическая обработка сигналов.

E-mail: guzel.idrisovna@gmail.com.

Guzel Idrisovna Abdrakhmanova (b. 1988), Candidate of Technical Science, received her Eng. Deg. in Multichannel Telecommunication Systems in 2010 from Ufa State Aviation Technical University. She works as the senior

researcher at the Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests include ultra wideband transmission systems, antennas, fiber optics, telecommunication systems, mathematical signal processing.

Ишмияров Арсен Арамаисович, 1991 года рождения, в 2013 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает младшим научным сотрудником на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: обработка сигналов, формирующие фильтры, сверхширокополосные системы передачи.

E-mail: airwolf91@yandex.ru.

Arsen Aramaisovich Ishmiyarov (b. 1991) received Eng. Deg. in 2013 in Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television from Ufa State Aviation Technical University. Currently he works as junior researcher at Telecommunication Systems department in USATU. His research interests include signal processing, pulse shaping filtering, ultra wideband transmission systems.

Янтилина Лилия Зуфаровна, 1991 года рождения, в 2013 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы», работает инженером на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, сверхширокополосные системы передачи.

E-mail: kleo-bai@mail.ru.

Liliya Zufarovna Yantilina (b. 1991) received Eng. Deg. in 2013 in Multichannel Telecommunication Systems from Ufa State Aviation Technical University. Currently she works as the engineer at Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests include fiber optics, telecommunication systems, ultra wideband transmission systems.

*Поступила в редакцию 19 октября 2015 г.
Окончательный вариант – 20 октября 2015 г.*