ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ И ФИЛЬТРЫ

УДК 538.975;621.382.13

БАЗОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Б.А. Лапшин, профессор ВАС, д.т.н.; balapchin@mail.ru

Ключевые слова: *оптические многослойные и многошлейфные фильтры, трансформаторы, амплитудные корректоры, оптические многослойные решетки, рабочее затухание в полосе пропускания и полосе задерживания, показатель преломления.*

Постановка задачи. Оптические многослойные покрытия и многошлейфные структуры (фильтры) находят широкое применение во многих устройствах со спектральным (частотным , волновым) разделением сигналов в диапазонах электромагнитных волн - от инфракрасного до рентгеновского (в диапазонах частот - от 3 ТГц до 30 ЭГц).

Указанные устройства востребованы при разработке технологий, предназначенных для обеспечения связи, космических исследований; в астрономии, геологии, биомедицине, энергетике, компьютерной технике; при создании новых материалов, новых видов оружия и средств управления ими. Известно, что интенсивное развитие телекоммуникационной отрасли во многом обусловлено благодаря широкому использованию волоконно-оптических систем передачи со спектральным (волновым) разделением (уплотнением, мультиплексированием) каналов (ВОСП-СР), где упомянутые выше оптические фильтры используются как основа формирования спектров индивидуальных и групповых сигналов.

Различают два типа оптических фильтров монолитной конструкции – цепочечные и шлейфные, отличающиеся друг от друга способами соединения элементов-резонаторов и элементов-связок. Конструкция цепочечного фильтра (оптического многослойного фильтра – ОМСФ) представляет собой каскадное (цепочечное) соединение двухэлементных полузвеньев в одном покрытии (рис.1); здесь все слои имеют толщину, равную четверти средней длины волны фильтра.

Конструкция ОМШФ — каскадное соединение двухэлементных полузвеньев в одной многошлейфной структуре (рис. 2).

Оптические многослойные фильтры. Известно большое количество зарубежных и отечественных работ, посвященных решению задач синтеза широкого перечня классов ОМСФ. Однако все они основаны на итерационных (не аналитических) методах вычислительной математики [3], что не позволяет получать оптимальные решения. В то же время, изучение природы распространения волн вдоль линий любого типа и явления отражения на их концах обнаруживает общие закономерности, позволяющие исследовать свойства всех типов ОМСФ класса волновых аналоговых фильтров (ВАФ) (или фильтров на элементах с распределенными параметрами) с общих позиций.

Аналитический метод синтеза ВАФ впервые подробно рассмотрен в [1] и распространен автором на синтез ОМСФ и ОМШФ [2, 5-8].

Особенность приложения метода синтеза ВАФ, рассмотренного в [1], к синтезу ОМСФ [2] заключается в том, что вместо нормированных волновых сопротивлений отрезков линии, равных $\rho_л = \sqrt{\mu / \varepsilon}$, где μ и ε соответственно нормированные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала среды распространения волны, используются нормированные показатели преломления $n = \sqrt{\mu\varepsilon}$. При $\mu = 1$ формально (но некорректно) можно считать $n = 1/\rho$. Последнее условие позволяет теорию и расчет ВАФ в базисе элементов с волновыми сопротивлениями [1] применить к расчету ОМСФ, ОМСТ и ОМСР (оптические многослойные трансформаторы и оптические многослойные решетки соответственно) в базисе элементов с показателями преломления. Что же касается ОМШФ, то поскольку их конструкция является монолитной с одинаковым значением n для всех элементов, задача их синтеза решается с применением параметров элементов в виде волновых сопротивлений.

Расчет ОМСФ включает три этапа:

- синтез ВАФ в соответствии с требованиями к частотным характеристикам функций цепи ОМСФ;
- реализация многослойного фильтра (МСФ) в исходной структуре ВАФ с заданными n материалов слоев;
- согласование МСФ с заданными n нагрузочных материалов сред входного и выходного устройств (подложек) с помощью оптических трансформаторов (ОТ1 и ОТ2), как это показано на рис. 1.

Исходными данными для расчета ОМСФ являются: тип частотной характеристики затухания (Чебышева, Баттерворта, Лежандра, Гаусса), граничные частоты полосы пропускания (ППр) f_{20} и f_{30}, ТГц, неравномерность рабочего затухания в ППр Δa, дБ, граничные частоты полосы задерживания (ПЗ) f_{2e} и f_{3e}, ТГц, гарантированное рабочее затухание в ПЗ a_{2e} и a_{3e}, дБ, показатели преломления нагрузочных сред $n_{н1}$ и $n_{н2}$, допустимый ряд значений n_i для материалов слоев.

Результатами расчета ОМСФ являются: топологическая структура фильтра с минимально возможным количеством слоев покрытия, показатели преломления которых находятся в пределах реализуемых значений; частотная характеристика рабочего затухания, удовлетворяющая заданным требованиям.

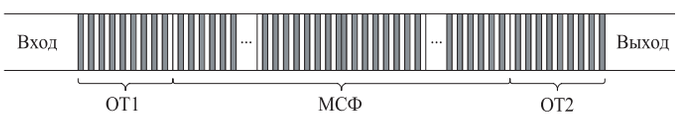

Рис. 1. **Топология оптического многослойного фильтра**

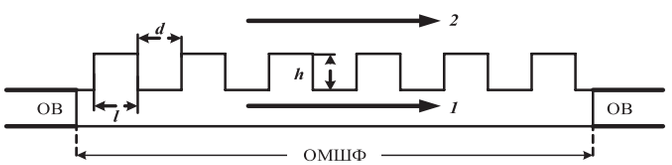

Рис. 2. **Конструкция ОМШФ**

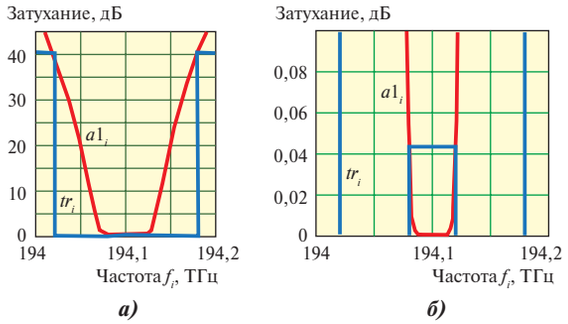

Рис. 3. **Частотная характеристика затухания ОМСФ-1: а) в ПЗ; б) в ППр**

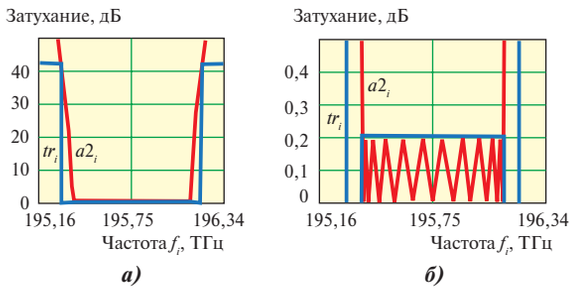

Рис. 4. **Частотная характеристика затухания ОМСФ-8: а) в ПЗ; б) в ППр**

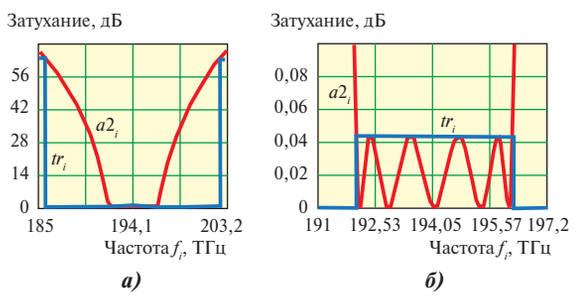

Рис. 5. **Частотная характеристика затухания ОМСФ-40: а) в ПЗ; б) в ПП**

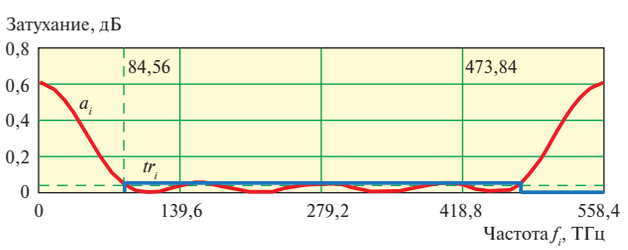

Рис. 6. **Частотная характеристика затухания ОМСТ**

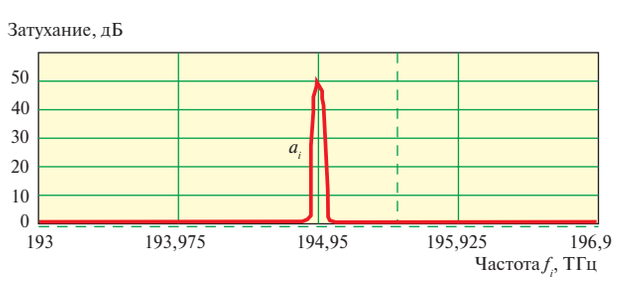

Рис. 7. **Частотная характеристика затухания заграждающего ОМСФ**

Наиболее перспективными избирательными устройствами, позволяющими формировать спектры узкополосных и широкополосных каналов передачи сигналов в различных диапазонах длин волн, представляются ОМСФ интерференционного типа. В них используются покрытия из материалов слоев с реализуемыми (выпускаемыми промышленностью) n, например для инфракрасного диапазона длин волн, — от 1,35 до 2,85 [10].

Ниже приводятся расчетные характеристики затухания некоторых ОМСФ, применяемых в устройствах ВОСП-СР, с топологией, приведенной на рис. 1.

Индивидуальный ОМСФ с характеристикой Баттерворта (ОМСФ-1) 21-го спектрального канала системы DWDM-40. В соответствии с рекомендациями стандарта ITU-T Rec. G.692 [3], выбрана средняя частота фильтра $f_0 = 194{,}10$ ТГц, что соответствует $\lambda_0 = 1545$ нм. В ППр, ограниченной частотами $f_{01} = 194{,}08$ ТГц и $f_{02} = 194{,}12$ ТГц, $\Delta a \le 0{,}04343$ дБ. В ПЗ, начиная с частот $f_{e1} = 194{,}02$ ТГц и $f_{e2} = 194{,}18$ ТГц, рабочее затухание $a \ge 40$ дБ. ОМСФ включается между нагрузочными средами с $n_{н1} = 1{,}52$ и $n_{н2} = 1{,}47$.

Расчетная частотная характеристика рабочего затухания ОМСФ-1 приведена на рис. 3. Толщина каждого из 180 слоев покрытия $d_0 = 386{,}25$ нм, общая толщина фильтра L=69,5 мкм. Топологическая формула фильтра имеет вид: $T = (H_1B_1)^9(B_2H_2)^{18}(H_2B_2)^{18}(B_3H_1)^9$. Значения n материалов слоев: $n_i = 1{,}45$; 1,429; 2,071; 2,151. Время счета в среде Mathcad —10 с.

Групповой ОМСФ с характеристикой Чебышева для выделения спектра частот восьми СК (ОМСФ-8) системы DWDM-40. Граничные частоты: ППр — $f_{01} = 195{,}38$ ТГц, $f_{02} = 196{,}12$ ТГц; ПЗ — $f_{e1} = 195{,}3$ ТГц, $f_{e2} = 196{,}2$ ТГц. Рабочее затухание: в ППр $\Delta a \le 0{,}2$ дБ, в ПЗ $a \ge 42{,}4$ дБ. Показатели преломления нагрузок (подложек) $n_{н1} = 1{,}52$ и $n_{н2} = 1{,}47$.

Средняя частота фильтра (рис. 4) f_0=195,75 ТГц (λ_0= =1531,52 нм). Топологическая формула ОМСФ-8 имеет вид:

$$T = (H_1B_1)^6(B_2H_2)^{13}(H_3B_3)^{13}(B_4H_4)^{13}(H_5B_5)^{13}(B_6H_6)^{13} =$$
$$= (H_6B_6)^{13}(B_5H_5)^{13}(H_4B_4)^{13}(B_3H_3)^{13}(H_2B_2)^{13}(B_7H_7)^6.$$

Толщина каждого из 284 слоев $d_0 = 382{,}88$ нм; общая длина фильтра $L = 109{,}7$ мкм.

Линейный ОМСФ с характеристикой Чебышева для выделения линейного спектра частот сорока СК (ОМСФ-40) системы DWDM-40. Граничные частоты: ППр $f_{01} = 192$ ТГц, $f_{02} = 196{,}2$ ТГц; ПЗ $f_{e1} = 185{,}6$ ТГц, $f_{e2} = 202{,}6$ ТГц. Рабочее затухание: в ППр $\Delta a \le 0{,}04343$ дБ, в ПЗ, на частоте накачки лазера оптического линейного усилителя $f_{нл} = 202{,}6$ ТГц (на длине волны 1480 нм), $a \ge 63{,}4$ дБ. Показатели преломления нагрузок (подложек) $n_{н1} = 1{,}47$ и $n_{н2} = 1{,}47$.

Средняя частота фильтра $f_0 = 194{,}1$ ТГц ($\lambda_0 = 1544{,}5$ нм). Топологическая формула ОМСФ-40:

$$T = (H_1B_1)^3(B_2H_2)^7(H_3B_3)^7(B_3H_3)^7(H_2B_2)^7(B_1H_1)^3.$$

Толщина каждого из 76 слоев покрытия $d_0 = 386{,}25$ нм, общая длина фильтра $L = 29{,}4$ мкм.

Оптические многослойные трансформаторы интерференционного типа — наиболее перспективные трансформирующие устройства (рис. 5), обеспечивающие согласованное включение двух сред с отличающимися друг от друга показателями преломления с минимальными потерями мощности на отражение. Особо важное применение ОМСТ находят при конструировании ОМСФ, где они выполняют задачу согласования избирательной части оптического фильтра – МСФ (рис. 1), имеющего характеристические показатели прелом-

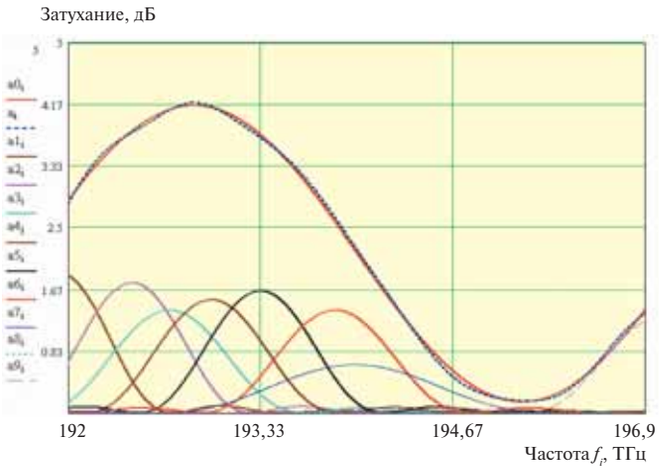

Рис. 8. **Заданная (сплошная) кривая затухания ОМСР, функция приближения (пунктирная кривая)**

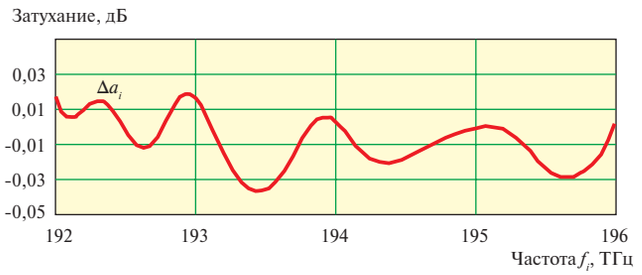

Рис. 9. **Кривая погрешности (невязки) приближения**

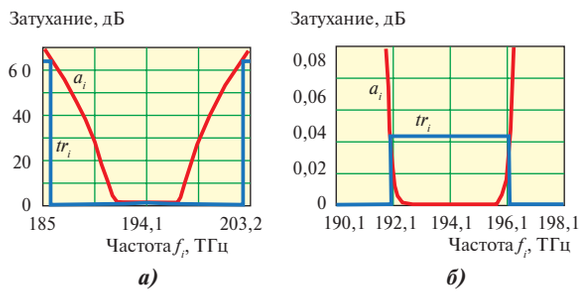

Рис. 10. **Частотная характеристика затухания ОМШФ-1: а) в ПЗ; б) в ППр**

ления порядка $10^4...10^8$ с нагрузочными подложками из материалов, имеющих реализуемые (выпускаемые промышленностью) значения n в пределах от 1,35 до 2,85.

Оптический многослойный трансформатор (с просветляющим покрытием) с характеристикой Чебышева, обеспечивающий согласованное включение двух оптических сред с $n_{н1} = 4$ и $n_{н2} = 1{,}88$. Граничные частоты ППр (рис. 6) $f_{01} = 84{,}56$ ТГц, $f_{02} = 473{,}84$ ТГц, средняя частота $f_0 = 279{,}2$ ТГц ($\lambda_0 = 1074$ нм). Рабочее затухание ОМСТ $\Delta a \le 0{,}05$ дБ. Толщина каждого из четырех слоев покрытия $d_0 = 268{,}5$ нм, общая толщина трансформатора $L = 1074$ нм. Время счета 10 с. Значения показателя преломления в пределах $n_{н1} = 4 > n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_{н2} = 1{,}88$.

Оптические многослойные решетки. Волоконно-оптическая решетка представляет собой отрезок сердцевины оптического волокна, в котором фотоиндукционным способом создана многослойная (цепочечная) структура с периодически слабо изменяющимся показателем преломления. Практически показатели преломления решетки изменяются в пределах от $n = n_0$ до $n = n_0 + \Delta n$, где $\Delta n = 0{,}004...0{,}01$.

Заграждающий ОМСФ на основе ОМСР (ЗФ-ОМСР) для подавления сигналов в спектре частот 21-го спектрального канала системы DWDM-40. Средняя частота ПЗ (рис. 7) $f_{з0} = 194{,}95$ ТГц, что соответствует длине волны $\lambda_{з1} = 1545$ нм. В ПЗ, ограниченной частотами $f_{з1} = 194{,}94$ ТГц и $f_{з2} = 194{,}96$ ТГц, $a_з = 50$ дБ. В ППр, начиная с частот $f_{e1} \le 194{,}83$ ТГц и $f_{e2} \ge 195{,}07$ ТГц, $\Delta a \le 0{,}1$ дБ. Показатели преломления чередующихся слоев $n_1 = 1{,}448$ и $n_2 = 1{,}444$. ОМСР включается между нагрузочными средами с $n_{н1} = n_{н2} = 1{,}446$. Количество четвертьволновых слоев N=9340; длина ЗФ-ОМСР L=5,386 мм.

Локальный корректор амплитудных искажений (КАИ) на основе ОМСР (ЛК-ОМСР). Рабочая полоса усиления волоконно-оптического усилителя (ВОУ) f_1=192<f<f_2=196 ТГц (диапазон длин волн λ_1 =1560, λ_2 =1530 нм). Частотная характеристика амплитудных искажений представлена на рис.8 (сплошная кривая). Перепад неравномерности рабочего затухания 4,1 дБ. Аппроксимационная функция не должна отклоняться от заданной функции затухания КАИ более чем на $\pm 0{,}05$ дБ).

Значения показателей преломления: подводящих (нагрузочных) сред n_0=1,446, первых компонентов — фотоиндуцированных слоев (резонаторов) n_1=1,448, вторых компонентов (связок) n_2=1,444.

На рис. 8 приведены частотные характеристики затухания: заданной функции (сплошная кривая), функции приближения (пунктир) и отдельных девяти локальных звеньев.

На рис. 9 приведена разностная характеристика затухания, из которой видно, что точность приближения удовлетворяет заданному требованию: $\Delta a = \pm 0{,}035$ дБ, что меньше заданной величины $\Delta a = \pm 0{,}05$ дБ. Количество слоев ЛК-ОМСР — 6872, общая длина КАИ $L_{КАИ} \approx 2{,}664$ мм.

Индивидуальный оптический многошлейфный фильтр с характеристикой Баттерворта (ОМШФ-1) 21-го спектрального канала системы DWDM-40. В соответствии с рекомендациями стандарта ITU-T Rec. G.692 средняя частота фильтра $f_0 = 194{,}10$ ТГц. В ППр, ограниченной частотами $f_{01} = 194{,}08$ ТГц и $f_{02} = 194{,}12$ ТГц, $\Delta a \le 0{,}04343$ дБ. В ПЗ, начиная с частот $f_{e1} = 194{,}02$ ТГц и $f_{e2} = 194{,}18$ ТГц, рабочее затухание $a \ge 40$ дБ. ОМСФ включается между нагрузочными средами с показателями преломления $n_i = 1{,}47$..

Расчетная частотная характеристика рабочего затухания ОМШФ-1 приведена на рис.10, Показатель преломления материала резонаторов и связок $n_i = 1{,}47$. Высота шлейфов — 386,35 нм. Общая длина ОМШФ — 2,5 мкм Топологическая формула фильтра имеет вид:

$$T = P_1\, C_1\, P_{12}\, C_2\, P_{23}\, C_3\, P_{33}\, C_3\, P_{32}\, C_2\, P_{12}\, C_1\, P_1\cdot,$$

где P – резонатор-шлейф (двухполюсник), C – связка (четырехполюсник). Время счета в среде Mathcad — 10 с.

Заключение. Применение аналитических методов общей теории электрических фильтров к синтезу оптических фильтров открывает широкие возможности для разработки цепей оптического диапазона длин волн, имеющих различные функциональные назначения. Все они могут найти применение во многих отраслях науки и техники. Впервые созданные аналитические методы синтеза ОФ могут использоваться при проектировании мультиплексоров ВОСП-СР, многочастотных оптических генераторов сетки стандартных несущих частот, толстопленочных ОФ инфракрасного, видимого и ультрафиалетового диапазонов длин волн, бесконтактных соединителей (в полевых соединительных муфтах) оптических волокон,

амплитудных и фазовых корректоров на основе волоконно-оптических решеток, линейных оптических усилителей. Круг разработок современных отечественных конкурентоспособных оптических устройств постоянно расширяется.

К сожалению, в современной технической политике продолжается практика игнорирования промышленностью отечественных пионерских работ. Заказчики и производители телекоммуникационной техники предпочитают тратить огромные средства на приобретение устаревших систем DWDM, вместо того чтобы для создания и развития прорывных высокотехнологичных и прибыльных разработок использовать новейшие отечественные научные достижения, способные обеспечить в будущем независимость от иностранных дорогостоящих и не всегда качественных изделий.

Сегодня назрела необходимость в централизации распыленных научных, производственных и финансовых усилий по созданию нового поколения конкурентоспособных волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов (ВОСП-СР), сделанных в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лапшин Б.А.** Новая теория и расчет фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий. СПб.: Наука, 1998 , 179 с.
2. **Лапшин Б.А.** Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. СПб.: БХВ-Петербург, 2012, 480 с.
3. **Тихонравов А.В., Трубецков М.К.** Новые задачи многослойной оптики // Радиотехника и электроника, 2005. — Т. 50. — № 2. — 265 с.
4. **Фриман Р.** Волоконно-оптиеские системы связи. М: «Техносфера», 2003, 440 с.
5. **Лапшин Б.А., Гончаров А.Н. и др.** Патент РФ RU 2 316 029 C1. от 01.08.2006 .Оптический многослойный фильтр.
6. **Лапшин Б.А., Петраков В.А. и др.** Патент РФ RU 2 330313 C1. от 27.07.2008 .Оптический многослойный фильтр.
7. **Лапшин Б.А., Матвейкин Г.В. и др.** Патент РФ RU 2383041 C1. от 27.02.2010 Волоконно-оптический соединитель.
8. **Лапшин Б.А., Мельников С.В. и др.** Патент РФ RU 2403042 C1 от 7.04.2010. Волоконно-оптический соединитель.
9. **Скляров О.К.** Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб.: Лань, 2010.--272 с.
10. **Путилин Э.С.** Оптические покрытия. СПб.: ГУ ИТМО, 2005, 200 с.

Получено после доработки 07.02.2013.

К ЮБИЛЕЮ БОРИСА АЛЕКСЕЕВИЧА ЛАПШИНА

Исполнилось 90 лет со дня рождения профессора Военной академии связи, доктора технических наук Б.А. Лапшина.

Б.А. Лапшин родился 15 июля 1923 г. в Читинской области. После окончания средней школы в Комсомольске-на-Амуре в 1941 г. был призван в Красную армию. В 1954 г. окончил Ленинградскую Военную Краснознаменную инженерную академию связи им. С.М. Буденного и продолжил службу в войсках ВС СССР. В 1960 г. завершил учебу в адъюнктуре при Военной академии связи, где и начал преподавательскую деятельность. Уволившись в запас, с 1974 по 1992 гг. работал старшим научным сотрудником, начальником сектора, начальником отдела в НПО «Дальняя связь».

В 1998 г. была издана его монография «Новая теория и расчет фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий», где впервые были опубликованы теория и аналитические методы синтеза систем на элементах с распределенными постоянными на основе метода фазоконтурного моделирования, что нашло применение при проектировании фильтров и трансформаторов на отрезках линий различных типов (механических, гидроакустических, диапазона СВЧ, диэлектрических и т.п.).

С появлением технологии DWDM в волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением каналов возникла проблема создания оптических устройств, связанных с обработкой сигналов в оптическом диапазоне частот. Приступив к решению этой проблемы, Б.А. Лапшин разработал аналитические методы синтеза оптических многослойных (ОМСФ) и многошлейфных (ОМШФ) фильтров, трансформаторов, волоконно-оптических решеток, корректоров, оптических датчиков различного применения, отражающих зеркал, бесконтактных соединителей двух сред с малыми потерями. Результаты этих исследований были опубликованы (2012 г.) в монографии «Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет», где приведены примеры аналитического расчета топологий различных оптических гетероструктур. Важность полученных результатов была подчеркнута Б.А. Лапшиным в его обращении к отечественным производителям: «Кто сегодня овладеет технологией проектирования и изготовления современных волновых мультиплексоров на основе ОМСФ, тот завтра будет лидером на мировом рынке ВОСП-СР».

Специалист по многоканальным системам передачи с частотным и временным разделением каналов (МСП с ЧРК, МСП с ВРК) — Б.А. Лапшин обратил внимание на незавершенность построения аппаратуры ВОСП-СР как оптической МСП с ЧРК, которая должна содержать в своем составе каналообразующую аппаратуру (КОА) с иерархией типовых каналов и оборудование линейного тракта (ОЛТ). Сегодня научная творческая деятельность Б.А.Лапшина направлена именно на решение актуальных вопросов, связанных с разработкой нового поколения конкурентоспособных ВОСП-СР с КОА на отечественных компонентнах.

Многие года Борис Алексеевич активно сотрудничает с нашим журналом, публикуя статьи по проблемам развития многоканальных систем передачи.

Б.А. Лапшин – участник Великой Отечественной войны, награжден боевыми орденами и медалями, отмечен благодарностями Верховного Главнокомандующего за участие в битвах за Днепр, за Сандомирский плацдарм, за освобождение Праги; участвовал в освобождении Украины, Молдавии, Польши и Чехословакии.

За заслуги и достижения в области науки и техники связи Б.А. Лапшин награжден знаком МО РФ «За заслуги в войсках связи», знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», дипломом Разум-Доблесть-Честь РАЕН с присуждением почетного звания и знака «Рыцарь науки и искусств»; является Почетным профессором Военной академии связи, членом Международной академии авторов научных открытий и изобретений, членом Академии военных наук РФ.

Редколлегия и редакция журнала «Электросвязь» поздравляют Бориса Алексеевича с замечательным юбилеем и желают ему здоровья и творческого долголетия.