

Синтез оптических многослойных фильтров

Борис ЛАПШИН
balapshin@mail.ru
Валерий ПЕТРАКОВ

Рассматривается теория волновых аналоговых фильтров, которая является основой аналитического метода синтеза оптических многослойных фильтров и методов их реализации. Приводится пример расчета оптического многослойного фильтра с характеристикой Чебышева.

Постановка задачи

Оптические многослойные фильтры (ОМСФ) находят широкое применение в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) с мультиплексированием по длине волны (МДВ). В окне прозрачности оптического волокна 1528–1561 нм может быть размещено 40 спектральных каналов (СК) с разномом 100 ГГц (0,8 нм), 80 СК с разномом 50 ГГц (0,4 нм) и 160 СК с разномом 25 ГГц (0,2 нм). Такое плотное размещение СК невозможно осуществить без использования сверхузкополосных оптических фильтров с относительной полосой пропускания (ПП) порядка 0,02%.

Известно большое количество работ, посвященных решению задач синтеза широкого перечня классов ОМСФ, но, к сожалению, все они основаны на итерационных (не аналитических) методах, что не позволяет получать оптимальные решения. В то же время, изучение природы распространения волн вдоль линии любого типа и явления отражения на их концах дает возможность выявить общие закономерности, позволяющие иссле-

довать свойства всех типов волновых аналоговых фильтров — ВАФ (или фильтров на элементах с распределенными параметрами) с общих позиций.

Аналитический метод синтеза ВАФ подробно рассмотрен в [1]. Этот метод основан на математическом моделировании $\lambda/4$ -отрезка передающей линии с волновым сопротивлением ρ_l и первой резонансной частотой f_0 , схемой фазового контура первого порядка ФК1П с волновым сопротивлением $\rho_{фк} = \rho_l$ и резонансной частотой $\Omega = F/F_0 = 1$. Текущие частоты оригинала (отрезка линии) и Ω модели (ФК1П) однозначно связаны между собой зависимостью

$$\Omega = \operatorname{tg}(\pi f/4f_0), \quad (1)$$

где $f_0 = (f_{02} + f_{03})/2$.

Метод моделирования позволяет перевести задачу синтеза ВАФ (как системы-оригинала с распределенными параметрами) в задачу синтеза фильтров на фазовых контурах (ФФК) (как системы-модели со сосредоточенными элементами) и воспользоваться всем арсеналом фундаментальных (классических) методов синтеза ЛС-фильтров. Задача синтеза ФФК, в свою очередь, может быть упрощена с использованием частотного преобразования $\Omega \rightarrow \eta$, где η — текущая частота НЧ-прототипа.

Одним из наиболее важных параметров ВАФ, а следовательно, и ФФК, является коэффициент неоднородности v , определяемый как отношение волновых сопротивлений связки ρ_c и резонатора ρ_p , то есть

$$v = \rho_c/\rho_p. \quad (2)$$

Анализ звена ВАФ цепочечного («П») типа с полуволновой («2») связкой — ВАФ-2-Ц (рис. 1а) — показывает, что оно имеет три ПП (нижнюю — НПП, среднюю — ПП и верхнюю — ВПП) и две полосы задерживания ПЗ.

Граничные частоты полос пропускания ВАФ-2-Ц (рис. 2) однозначно определяются через коэффициент η в виде:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{4f_0}{\pi} \operatorname{arctg}(\sqrt{1+v^{-1}} - \sqrt{v^{-1}}) = \\ &= \frac{4f_0}{\pi} \operatorname{arctg}\Omega_1; \\ f_4 &= 2f_0 - f_1; \quad \Omega_4 = \frac{1}{\Omega_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{4f_0}{\pi} \operatorname{arctg}(\sqrt{1+v} - \sqrt{v}) = \\ &= \frac{4f_0}{\pi} \operatorname{arctg}\Omega_2; \\ f_3 &= 2f_0 - f_2; \quad \Omega_3 = \frac{1}{\Omega_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

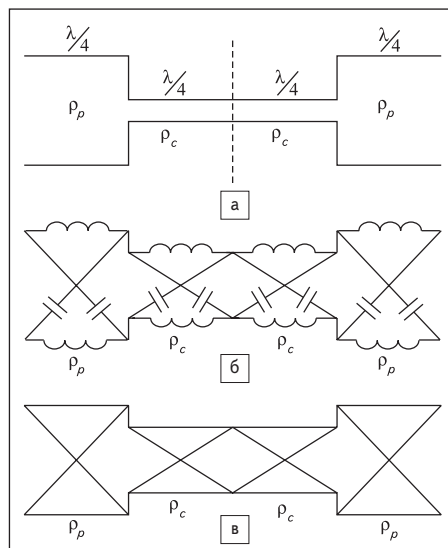


Рис. 1. а) Звено ВАФ-2-Ц, б) его модель ФФК-2-Ц, в) условное обозначение схемы звена ФФК-2-Ц

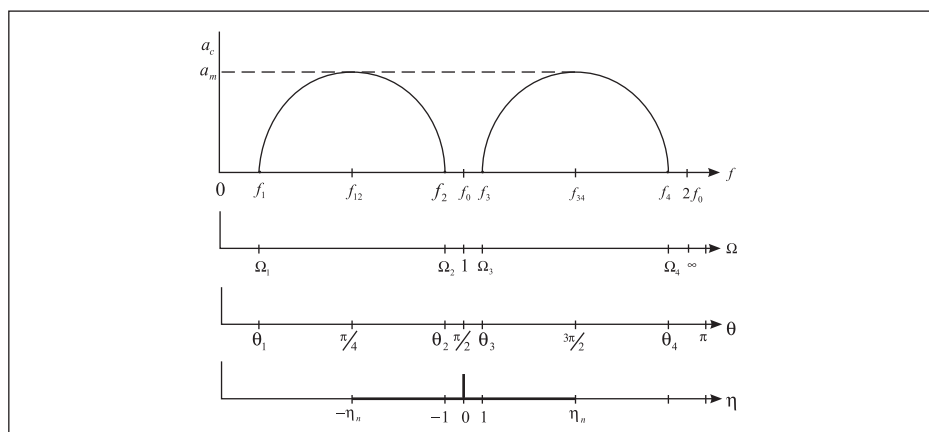


Рис. 2. Частотные характеристики собственного затухания звена ВАФ-2-Ц

Значения характеристических сопротивлений полузвена ВАФ-2-Ц со стороны резонатора (ρ_c) и со стороны связки (ρ_p) на средней частоте ПП f_0 определяются выражениями:

$$Z_{\rho_c} = \frac{\rho_p}{\sqrt{v}}; Z_{\rho_p} = \rho_c \sqrt{v}. \quad (5)$$

Особенность приложения метода синтеза ВАФ, рассмотренного в [1] применительно к СВЧ-фильтрам, к синтезу ОМСФ заключается в том, что вместо нормированных волновых сопротивлений отрезков линии, равных $\rho_d = \sqrt{\mu/\epsilon}$, где μ и ϵ соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости материала среды распространения волны, используются нормированные показатели преломления n , равные, при выполнении условия $\mu = 1$, $n = \sqrt{\epsilon} = 1/\rho_d$.

Расчет ОМСФ включает три этапа:

1. Синтез исходного сверхзаклопосного ВАФ.
2. Реализация исходной многослойной структуры ВАФ с заданными показателями преломления материалов слоев.
3. Согласование оптического многослойного фильтра с заданными показателями преломления нагрузочных материалов входного и выходного устройств.

Синтез исходного сверхзаклопосного фильтра

Исходными данными для расчета ВАФ являются: граничные частоты ПП f_{20} и f_{30} , неравномерность рабочего затухания в ПП Δa , граничные частоты ПЗ f_{2e} и f_{3e} , гарантированное рабочее затухание в ПЗ a_{2e} и a_{3e} , нагрузочные сопротивления на входе и выходе фильтра R_T и $R_{T'}$. Для ОМСФ необходимо дополнительно включить в исходные данные перечень заданных (допустимых) значений показателей преломления материалов слоев n_i и подложки n_0 . Количество материалов зависит, в основном, от сложности заданной частотной характеристики затухания ОМСФ. Однако более технологичным считается ОМСФ, в котором используется только два материала.

Результатом синтеза исходного фильтра является определение топологической структуры ВАФ с минимальным количеством четвертьволновых отрезков неоднородной линии, рабочее затухание которой удовлетворяет заданным требованиям.

Метод синтеза исходного фильтра основан на методе моделирования каждого $\lambda/4$ -отрезка линии схемой ФК1П, при этом задача синтеза исходного ВАФ-2-Ц переводится в задачу синтеза исходного ФКФ-2-Ц. На основании формул (3) и (4) определяем граничные частоты ПП и ПЗ ФКФ-2-Ц:

$$\Omega_i = \text{tg}(\pi f_i / 4f_0). \quad (6)$$

Задача синтеза ФКФ-2-Ц, в свою очередь, может быть переведена в задачу синтеза НЧ-про-

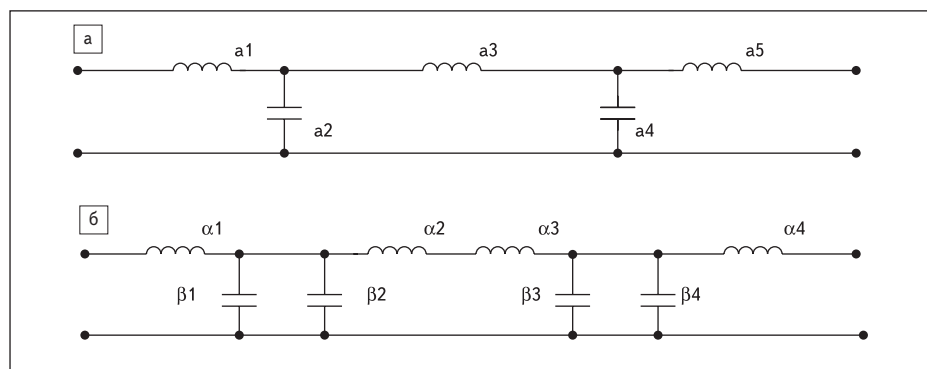


Рис. 3. а) Схема полученного на первом этапе НЧ-прототипа, б) разбиение схемы на полузвенья

типа с ограниченной ПЗ с помощью преобразования частоты:

$$\eta_i = S_i / S_0 = \eta_k S_i, \quad (7)$$

где η — текущая частота НЧ-прототипа; η_k — граничная частота возможного копирования частотной характеристики рабочего затухания НЧ-прототипа, равная обратной величине коэффициента прозрачности рабочей ПП ФКФ-2-Ц S_0 ; S_i — коэффициент прозрачности собственной ПП отдельного полузвена (звена) ФКФ-2-Ц.

Коэффициенты S_0 и S_i определяются через соответствующие коэффициенты неоднородности v :

$$S_0 = \frac{2\sqrt{v_0}}{(1+v_0)}, S_i = \frac{2\sqrt{v_i}}{(1+v_i)}, \quad (8)$$

где коэффициенты v_0 и v_i определяются через граничные частоты рабочей ПП ФКФ-2-Ц и собственной ПП отдельного полузвена (звена) фильтра

$$v_0 = \frac{(\Omega_{30} - \Omega_{20})^2}{4}, v_i = \frac{(\Omega_{3i} - \Omega_{2i})^2}{4}. \quad (9)$$

Используя последовательно формулы (6), (9), (8) и (7), получим выражение

$$\eta = \sin 2\Theta / \sin 2\Theta_{20}, \quad (10)$$

где $\Theta = \pi f / 2f_0$ — текущая волновая длина и $\Theta_{20} = \pi f_{20} / 2f_0$ — нижняя граничная волновая длина средней ПП ВАФ-2-Ц. Преобразование (10) позволяет перейти непосредственно от переменной f ВАФ к переменной η НЧ-прототипа (рис. 3). Рабочее затухание НЧ-прототипа с характеристикой Чебышева определяется по известной [1] формуле:

$$a = 10 \lg(1 + h^2 \cos^2(\text{marccos} \eta)), \quad (11)$$

где $h = \sqrt{10^{\Delta a/10} - 1}$.

Из (11) можно узнать параметр m , определяющий количество элементов схемы НЧ-прототипа, в виде

$$m \geq \frac{a_{2e} + 6 - 10 \lg(10^{\Delta a/10} - 1)}{20 \lg(\eta_e + \sqrt{\eta_e^2 - 1})}. \quad (12)$$

Значения элементов схемы НЧ-прототипа находятся аналитически [1] или из справочника [2].

Следующая задача состоит в том, чтобы найденное решение задачи синтеза НЧ-прототипа преобразовать в решение для ФКФ, а далее — для ВАФ и использовать значения элементов схемы НЧ-прототипа [2] для нахождения значений волновых сопротивлений каждого отрезка линии (резонатора — ρ_{pi} и связки — ρ_{ci}) топологической структуры ВАФ-2-Ц.

Алгоритм определения граничных частот собственных ПП и волновых сопротивлений резонаторов и связок Г-полузвеньев ФКФ-2-Ц представлен следующими процедурами:

$$\begin{aligned} \eta_i \rightarrow f_i(10) \rightarrow v_i \rightarrow \\ \rightarrow \rho_{pi}(12) \rightarrow \rho_{ci}(2). \end{aligned} \quad (13)$$

На этом заканчивается синтез исходной схемы ВАФ-2-Ц, являющийся первым этапом синтеза ОМСФ. В результате получена топология ВАФ-2-Ц, удовлетворяющая требованиям по рабочему затуханию. Однако это решение не удовлетворяет конструктивным требованиям к ОМСФ.

Во-первых, нормированные волновые сопротивления связок для сверхзаклопосного фильтра, каковым является исходная схема ВАФ-2-Ц, имеют значения порядка $10^{-4} \dots 10^{-8}$, и, следовательно, нормированные показатели преломления слоев-связок должны быть равны $10^{-4} \dots 10^{-8}$. Такие значения показателей преломления не реализуемы, и поэтому необходимо решить дополнительную задачу — реализацию сверхзаклопосных фильтров с заданными (допустимыми) значениями n_{ci} . При практическом изготовлении многослойных покрытий показатели преломления соседних слоев (резонатора и связки) отличаются друг от друга не более, чем в 1,5–2 раза, то есть коэффициент v из (2) не может быть меньше 0,5.

Во-вторых, расчетная величина нормированного нагрузочного сопротивления исход-

ного ВАФ-2-Ц определяется сотнями и тысячами единиц, в то время как нормированное значение нагрузок ОМСФ должно быть равно единице. Следовательно, необходимо решать еще и вторую дополнительную задачу реализации — обеспечение согласованного включения ОМСФ.

Реализация исходного ВАФ с заданными волновыми сопротивлениями резонаторов и связей

Из [1] известно, что полувзвено исходного фильтра ВАФ-2-Ц является одновременно и двухступенчатым волновым аналоговым трансформатором (ВАТ) с коэффициентом трансформации, равным

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{Z_{pc}}{Z_{cp}}} = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_c} \times \frac{1}{v_1}} = \frac{1}{v_1}. \quad (14)$$

Для получения технологически приемлемых значений v_k исходный трансформатор с коэффициентом трансформации ξ_1 заменяют каскадным соединением k одинаковых трансформаторов с коэффициентами трансформации, равными

$$\xi_k = \sqrt[k]{\xi_1} = \frac{1}{\sqrt[k]{v_1}} = \frac{1}{v_k}. \quad (15)$$

Коэффициент k определяет необходимое количество двухступенчатых трансформаторов, при котором выполняются заданные условия реализуемости исходного звена ВАФ-2-Ц:

$$\rho_{p0} = n_0/n_p; \quad \rho_{ci} = \rho_{p0} \times k = n_0/n_c. \quad (16)$$

Коэффициент k можно определить, решив уравнение

$$\frac{v_k^k}{v_1} - \sum_{i=1}^{2k-1} (2k-i)v_k^{k-i} = 0, \quad (17)$$

где v_k — коэффициент неоднородности (2), задаваемый условием задачи в виде:

$$v_k = n_p/n_{ck}. \quad (18)$$

Таким образом, задача реализации сверхузкополосного ВАФ-2-Ц со сложной связкой имеет решение, обеспечивающее топологическую структуру в виде чередующегося соединения $\lambda/4$ -резонаторов (ρ_{p0}) и $\lambda/4$ -связок с заданными значениями волновых сопротивлений ρ_k .

Количество $\lambda/4$ -элементов одного полувзвена ВАФ-2-Ц со сложной связкой равно

$$N_1 = 2k, \quad (19)$$

а многослойного фильтра

$$N_{mf} = 2 \sum_{i=1}^{m-1} N_i = 4 \sum_{i=1}^{m-1} k_i. \quad (20)$$

Решение второй задачи реализации ОМСФ, то есть задачи реализации входного и выходного ВАТ, обеспечивающих согласованное включение исходного фильтра между заданными нагрузочными сопротивлениями, состоит в определении количества s двухступенчатых трансформаторов или количества N элементов ВАТ:

$$N_t = 2s, \quad (21)$$

а общее количество слоев в оптическом фильтре, нагруженном на единичные сопротивления (на подложки с единичными нормированными показателями преломления $n_0 = 1$), будет равно

$$N_{общ} = N_{mf} + 2N_t. \quad (22)$$

Пример расчета оптического фильтра

Расчитать многослойный оптический фильтр с характеристикой Чебышева, если:

- в полосе частот (в диапазоне длин волн) $f_{02} = 193,49845 < f < f_{03} = 193,59834$ ТГц ($\lambda_{02} = 1550,4 > \lambda > \lambda_{03} = 1549,6$ нм) неравномерность рабочего затухания не должна превышать $\Delta a = 0,4648$ дБ;
- в полосах частот (в диапазоне длин волн) $100 < f < f_{e2} = 193,39865$ Нуу ($3000 > \lambda > \lambda_{e2} = 1551,2$ нм) и $f_{e3} = 193,6982 < f < 300$ ТГц ($\lambda_{e3} = 1548,8 > \lambda > 1000$ нм) гарантированное рабочее затухание должно быть не менее $a_{e2} = a_{e3} = 30$ дБ;
- показатели преломления подводящих (нагрузочных) световодов $n_0 = 1,52$, слоев-резонаторов $n_p = 1,45$ и слоев-связок $n_c = 2,1$.

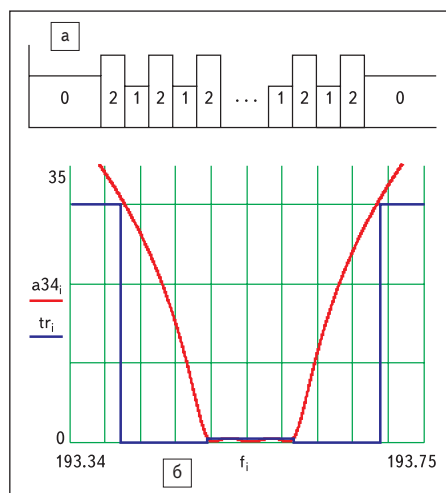


Рис. 4. а) Профиль показателей преломления слоев: 0 — подложки ($n_0 = 1,52$), 1 — резонатора ($n_1 = 1,45$), 2 — связи ($n_2 = 2,1$), б) частотная характеристика затухания ОМСФ

В результате расчета получена топология ОМСФ, в которой содержится 96 чередующихся четвертьволновых слоев с общей толщиной покрытия $l_{общ} = 37,2$ микрона. На рис. 4а, б приведены рельеф показателей преломления найденной структуры фильтра и его расчетная частотная характеристика затухания, которая, как это видно из рисунка, отвечает заданным требованиям.

Заключение

В статье рассмотрен метод синтеза сверхузкополосных оптических фильтров, основанный на методах моделирования четвертьволновых отрезков линии схемами фазовых контуров первого порядка, синтеза LC-фильтров и эквивалентного преобразования схем.

Исторически сложилось так, что вопросы расчета оптических фильтров стали занимать в основном специалисты по оптике, поэтому используемые при этом расчетные методы и терминология отличаются от принятых в теории электрических фильтров. В настоящей статье специально приведен пример аналитического, а следовательно, оптимального расчета чебышевского сверхузкополосного оптического фильтра с целью продемонстрировать возможность применения методов (и терминологии) общей теории фильтров к синтезу фильтров оптического диапазона. Сравнение результатов расчета итерационными методами и предлагаемым аналитическим методом по количеству слоев (в приведенном примере 124 и 96 слоев) и общей толщине покрытия показывает существенное превосходство последнего.

Применение аналитических методов общей теории электрических фильтров к синтезу оптических фильтров открывает, по мнению авторов, широкие возможности разработки многих цепей оптического диапазона — узкополосных и широкополосных полосовых и режекторных фильтров с любыми заданными частотными характеристиками затухания и фазы (группового времени), оптических трансформаторов, амплитудных выравнителей, фазовых корректоров и т. п.

Литература

1. Лапшин Б. А. Новая теория и расчет фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий. СПб.: Наука. 1998.
2. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров. М.: Радио и связь. 1983.
3. Лапшин Б. А. Аналитический метод синтеза оптических многослойных фильтров. СПб.: VI Международный оптический конгресс «Оптика — XXI век». Сборник трудов VII международной конференции «Прикладная оптика 2006». Том 3. Компьютерные технологии в оптике. 2006.