

Моделирование и синтез узкополосных оптоволоконных фильтров

Алексей РАЕВСКИЙ,
д. ф.-м. н.
Владимир БУГРОВ,
к. т. н.
Василий МАЛАХОВ,
к. т. н.
bug@rf.unn.ru

В статье рассматриваются вопросы моделирования и синтеза одного из основных компонентов тракта волоконно-оптической линии связи — узкополосных селективных фильтров на основе неоднородной брегговской волоконной решетки. Приводятся постановка и решение задачи параметрического синтеза узкополосного оптоволоконного фильтра методами нелинейного математического программирования. Проведена оценка характеристик синтезированного фильтра.

Введение

Брегговская волоконная решетка (БВР) в настоящее время является одним из ключевых элементов в различных устройствах волоконной оптики. БВР, в частности, применяются в качестве составных частей мультиплексоров и демультимплексоров [1], компенсаторов дисперсии [2] в волоконно-оптических линиях связи, зеркал волоконных [3] и полупроводниковых [4] лазеров, чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков физических величин [5] и т. д.

Брегговские решетки связывают основную моду волоконного световода, распространяющуюся в прямом направлении по волоконному световоду (ВС), с основной модой, распространяющейся в противоположном направлении, на резонансной длине волны $\lambda_{БР}$, задаваемой соотношением:

$$2n_{эф}\Lambda = \lambda_{БР}, \quad (1)$$

где $n_{эф}$ — эффективный показатель преломления основной моды; Λ — период решетки.

Запись брегговских решеток, как правило, проводится в интерференционной картине ультрафиолетового (УФ) излучения. Используется свойство кварцевого стекла, легированного GeO_2 (в области сердцевины ВС): под воздействием УФ-излучения такое стекло необратимо изменяет показатель преломления.

Вопросы расчета и изготовления БВР, измерения их физических свойств и специфики их применения отражены в [6, 7].

Наиболее важной характеристикой БВР являются их спектральные свойства. Основные из них: спектральное положение резонанса, а также его ширина и коэффициент отражения в максимуме. В ряде случаев представляют интерес и другие спектральные характеристики: глубина и амплитуда боковых

резонансов, селективные коротковолновые потери, обусловленные связью с оболочечными модами, спектральная зависимость дисперсии и др. [7].

Моделирование спектральных свойств

Расчет спектральных характеристик БВР обычно выполняют с применением теории связанных мод, в рамках которой предполагается, что при заданной длине волны лишь для двух определенных мод выполняется условие фазового синхронизма, и только эти моды могут обмениваться энергией друг с другом [8].

Связь основных мод, распространяющихся в противоположных направлениях, осуществляется на длине волны $\lambda_{БР}$, определяемой уравнением (1). Расчет эффективного показателя преломления основной моды ВС с записанной в его сердцевине БВР будем проводить с помощью методики, описанной в [9]. При этом считаем распределение наведенного показателя преломления $\Delta n_{нав}$ постоянным по радиусу сердцевины. Его связь с изменением эффективного показателя преломления основной моды $\Delta n_{эф}$:

$$\Delta n_{эф} = \eta \Delta n_{нав}, \quad (2)$$

где

$$\eta = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} E_r H_\phi^* r dr d\phi}{\int_0^a \int_0^{2\pi} E_r H_\phi^* r dr d\phi} \quad (3)$$

— это доля мощности основной волны, проходящей на сердцевину ВС; E_r, H_ϕ — поперечные компоненты электромагнитного поля волны HE_{11} в цилиндрической системе координат.

Наведенное при записи решетки изменение показателя преломления в сердцевине

световода вдоль его оси может быть описано следующим образом:

$$\Delta n_{нав}(z) = \Delta n_{ср} + \Delta n_{мод} \cos((2\pi z)/\Lambda_0), \quad (4)$$

где $\Delta n_{ср}$ и $\Delta n_{мод}$ — среднее значение и амплитуда модуляции наведенного показателя преломления соответственно. Усредненный период решетки Λ_0 удобно выбирать таким, чтобы он соответствовал центральной длине волны λ_0 в спектре отражения решетки:

$$\lambda_0 = 2(\Delta n_{эф} + \eta \Delta n_{ср})\Lambda_0. \quad (5)$$

На определенной длине волны λ взаимодействие мод, распространяющихся в противоположных направлениях, на брегговской решетке описывается системой уравнений связанных мод [10]:

$$(\partial R(z))/(\partial z) = -i\sigma(z)R(z) + ik(z)S(z),$$

$$(\partial S(z))/(\partial z) = -i\sigma(z)S(z) + ik(z)R(z), \quad (6)$$

где $R(z)$ и $S(z)$ — медленно меняющиеся на масштабе длины волны амплитуды волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях соответственно.

Спектральную отстройку от строгого резонанса можно вычислить по формуле [7]:

$$\sigma(z) = (2\pi n_{эф}(z))/\lambda = \pi/\lambda, \quad (7)$$

где $n_{эф}$ определяется с учетом формулы (2).

Коэффициент связи решетки вычисляют по формуле:

$$k(z) = (\pi\eta\Delta n_{мод}(z))/\lambda. \quad (8)$$

Для случая однородных БВР $\sigma(z) = \sigma = \text{const}$ и $k(z) = k = \text{const}$. Система линейных однородных дифференциальных уравнений

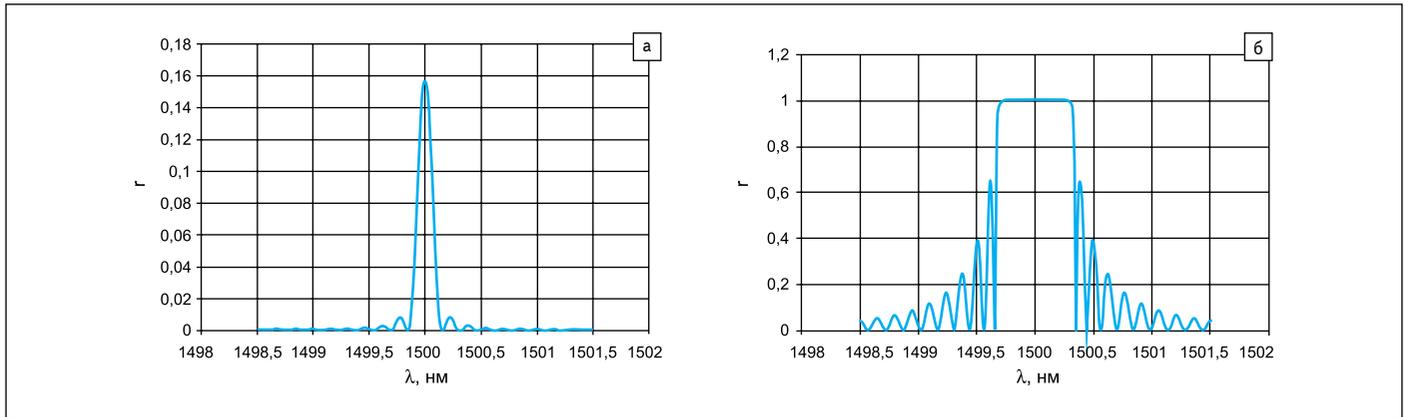


Рис. 1. Коэффициент отражения однородной БВР при: а) $\Delta n_{\text{мод}} = 5 \times 10^{-5}$; б) $\Delta n_{\text{мод}} = 7,5 \times 10^{-4}$

первого порядка (б) имеет постоянные коэффициенты. Ее решение:

$$\begin{pmatrix} R(z) \\ S(z) \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} k \\ -i\gamma_B - \sigma \end{pmatrix} \exp(\gamma_B z) + C_2 \begin{pmatrix} k \\ -i\gamma_B - \sigma \end{pmatrix} \exp(-\gamma_B z), \quad (9)$$

где $\gamma_B = \sqrt{k^2 - \sigma^2}$, C_1, C_2 — произвольные постоянные.

Систему (9) решаем при граничных условиях: $R(\lambda, 0) = 1$ и $S(\lambda, L) = 0$, что соответствует падающей на БВР волне с единичной амплитудой и отсутствию излучения, падающего на решетку с обратной стороны.

Неизвестны комплексный коэффициент отражения $S(\lambda, 0)$ и коэффициент передачи $R(\lambda, L)$ решетки длиной L , которые без учета потерь в материале связаны согласно закону сохранения энергии:

$$|R(\lambda, L)|^2 + |S(\lambda, 0)|^2 = 1.$$

На рис. 1а представлена зависимость коэффициента отражения однородной БВР от длины волны при следующих параметрах решетки: $L = 5 \times 10^{-3}$ м, $\Delta n_{\text{мод}} = 5 \times 10^{-5}$, $\eta = 0,8$, $n_{\text{эф}} = 1,444763$, $\Lambda = 5,1889 \times 10^{-7}$ м.

На рис. 1б приведена аналогичная зависимость при тех же параметрах БВР, но с $\Delta n_{\text{мод}} = 7,5 \times 10^{-4}$. Видно, что увеличение $\Delta n_{\text{мод}}$ повышает коэффициент отражения, расширяет полосу отражения, однако при этом возрастает отражение в боковых максимумах, обусловленное многократным переотражением волны на неэквидистантных неоднородностях.

Очевидно, что подавить боковые лепестки коэффициента отражения можно лишь в неоднородных решетках, меняя по определенному закону либо период Λ либо амплитуду модуляции наведенного показателя преломления $\Delta n_{\text{мод}}$, либо то и другое одновременно.

Рассмотрим неоднородную БВР, представляя ее состоящей из N однородных решеток. Для определения коэффициента отражения используем матричный аппарат из теории СВЧ-четырёхполюсников [11]. На рис. 2 показаны графики зависимости $r = |S(\lambda, 0)|^2$ для БВР ($L = 5 \times 10^{-3}$ м, $\Delta n_{\text{мод}} = 5 \times 10^{-5}$, $\eta = 0,8$, $n_{\text{эф}} = 1,444763$), с периодом, изменяющимся линейно:

- от $5,188 \times 10^{-7}$ до $5,19 \times 10^{-7}$ м (рис. 2а);
- от $5,1875 \times 10^{-7}$ до $5,1905 \times 10^{-7}$ м (рис. 2б);
- от $5,187 \times 10^{-7}$ до $5,191 \times 10^{-7}$ м (рис. 2в);

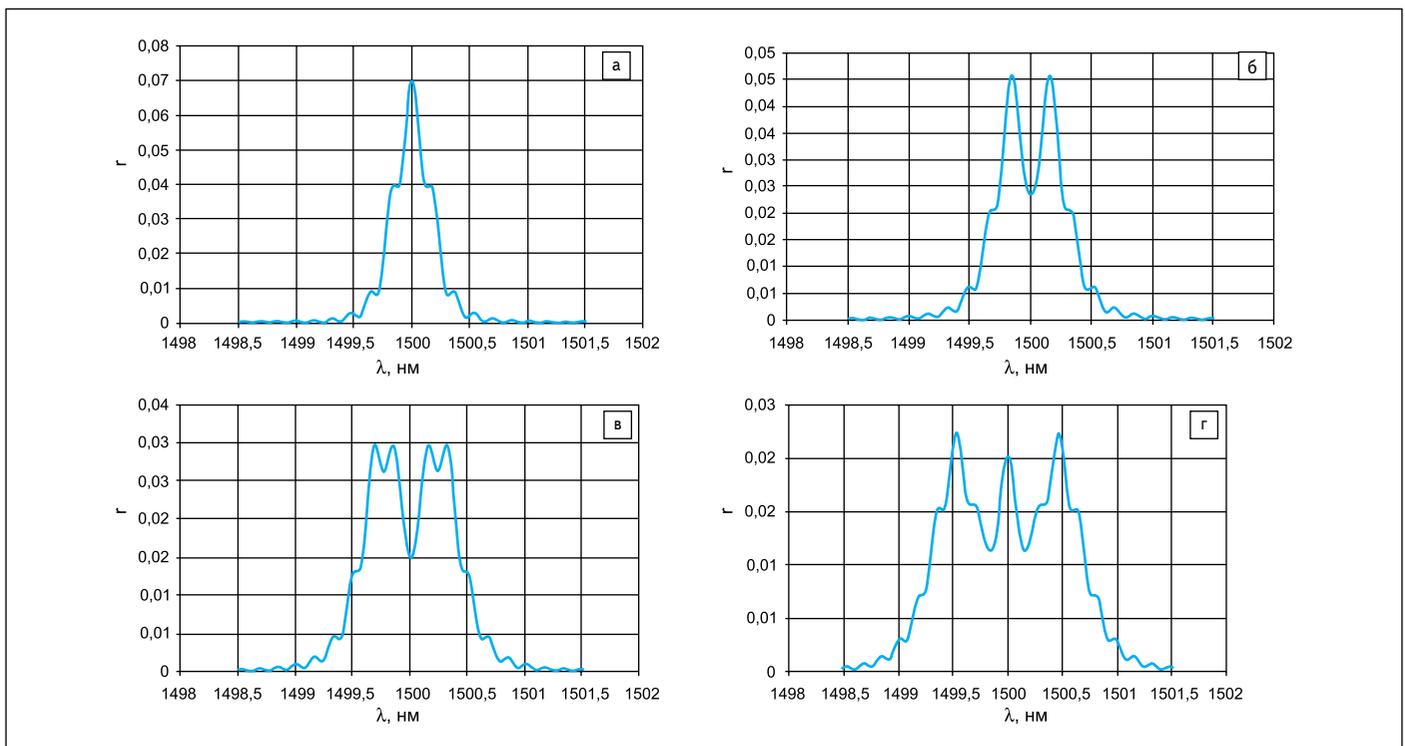


Рис. 2. Зависимость $r = |S(\lambda, 0)|^2$ для БВР

- от $5,1865 \times 10^{-7}$ до $5,1915 \times 10^{-7}$ м (рис. 2г).

Видно, что, изменяя период, удается уменьшить боковые пики отражения, однако при этом значительно изменяется зависимость r в основном пике: появляются минимумы отражения и расширяется полоса отражения. Таким образом, получение заданной характеристики $r = |S(\lambda, 0)|^2$ узкополосного оптоволоконного фильтра возможно путем синтеза основных параметров решетки по ее длине.

Параметрический синтез оптоволоконного фильтра

Многофункциональный синтез узкополосных фильтров на основе БВР, то есть синтез по совокупности требуемых функциональных характеристик, таких как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), фазо-частотная характеристика (ФЧХ), время групповой задержки (ГВЗ), наиболее эффективно осуществлять методами нелинейного математического программирования [12, 13]. Математическое программирование — это инвариантная и весьма эффективная методология решения задач проектирования, общая идея которой состоит в привязке решения задачи к четкому инвариантному математическому признаку — экстремуму функции качества (цели) $F(\mathbf{X})$, где \mathbf{X} — вектор искомых параметров устройства.

Для любой задачи такую функцию в общем виде всегда можно сформулировать исходя из заданных требований (в компьютерных пакетах это обычно делает функциональный редактор). При наличии такой функции решение задачи синтеза БВР-фильтра сводится к процедуре минимизации $F(\mathbf{X})$, то есть к отысканию координат глобального экстремума (оптимальных параметров фильтра \mathbf{X}^0), что обычно делается поисковыми методами. Критерием поиска при этом является соответствие совокупного текущего функционирования фильтра его требуемому функционированию. Современные алгоритмические комплексы нелинейной минимизации позволяют решать такую задачу весьма надежно и эффективно при выполнении всех внешних требований и ограничений к работе фильтра. Это дает возможность повысить качество БВР-фильтра, снизить стоимость и существенно сократить время его разработки.

Рассмотрим основные этапы этого подхода на примере синтеза узкополосного фильтра на основе одномодовых оптических волокон для длины волны 1550 нм при полосе пропускания фильтра 0,72 нм, коэффициенте прямоуглольности 0,9, потерях не выше -1 дБ (коэффициенте отражения не ниже 0,95) и внеполосном подавлении боковых лепестков на уровне -50 дБ. (Требуемая характеристика фильтра приведена на рис. 3.) При этом в качестве базовой структуры фильтра была выбрана форма каскадного соединения N регулярных звеньев с параметрами $\Delta n_{\text{мод}i}$ и ℓ_i и с общей передаточной функцией (коэффициентом отражения):

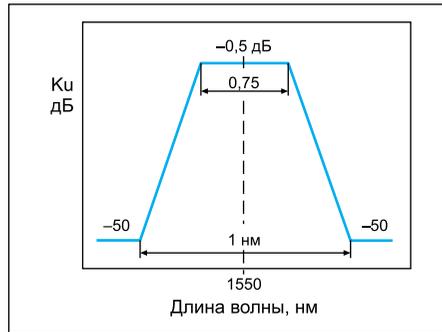


Рис. 3. Требуемая характеристика коэффициента отражения фильтра

$$S(\lambda, 0) = \prod_{i=1}^N s_i(\lambda, 0), \quad (10)$$

где $s_i(\lambda, 0)$ — коэффициент отражения i -го звена.

Задачу параметрического синтеза узкополосного оптоволоконного фильтра можно записать так:

$$F^0(\mathbf{X}^0) = \min F(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in E^{2N}, \quad (11)$$

$$5 \times 10^{-5} \leq \Delta n_{\text{мод}i} \leq 7 \times 10^{-4}, \\ 70 \text{ мкм} \leq \ell_i \leq 200 \text{ мкм}, i = \overline{1, N}, \quad (12)$$

$$\Lambda_i = 536,1826 \text{ нм}. \quad (13)$$

Минимизация целевого функционала (11) осуществляется на многомерном пространстве параметров фильтра в допустимой области поиска (12) при фиксированном периоде решетки (13). Варьировалась длина ℓ_i решеток, а также амплитуда наведенного показателя преломления $\Delta n_{\text{мод}i}$.

Целевой функционал данной задачи:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{n=1}^8 \beta_n \times f_n(\mathbf{X}) \quad (14)$$

сформировался функциональным редактором пакета синтеза в виде аддитивной свертки восьми частотных характеристик фильтра (частотных окон), определяющих выполнение приведенных функциональных требований как в полосе пропускания фильтра, так и вне ее. Поисковое итеративное решение экстремальной задачи синтеза (11) в заданном пространстве варьируемых параметров осуществлял программный алгоритмический комплекс нелинейной минимизации многомерных целевых функций [13], обращаясь к модельному блоку программы для расчета текущих функциональных характеристик фильтра. Вектор \mathbf{X}^0 , минимизирующий скалярную целевую функцию $F(\mathbf{X})$ на множестве допустимых решений (12), стал эффективным решением задачи параметрического синтеза узкополосного БВР-фильтра.

На рис. 4а приведена синтезированная АЧХ в полосе, полученная для фильтра на ос-

нове неоднородной БВР с числом звеньев $N = 16$, при длине решетки $L = 3,1756 \times 10^{-3}$ м, брэгговской длине волны $1,55 \times 10^{-6}$ м, $\eta = 0,8$, $n_{\text{эф}} = 1,444763$. А на рис. 4б представлена АЧХ для того же фильтра в более широком диапазоне частот. Графики показывают, что подавление боковых максимумов составляет -58 дБ, а ослабление на центральной частоте равно -1,5 дБ.

На рис. 5а приведена синтезированная АЧХ в полосе, полученная для фильтра на основе неоднородной БВР с числом звеньев $N = 24$, а на рис. 5б — для того же фильтра, но в большем частотном диапазоне. Нетрудно заметить, что спады АЧХ в полосе стали более крутые, а ослабление на центральной частоте составило -0,7 дБ.

Заключение

Методы нелинейного программирования в приложении к задачам проектирования узкополосных фильтров для волоконно-оптических линий связи являются современной и весьма перспективной альтернативой традиционным аналитическим подходам. Принципиальное отличие в данном случае состоит в прямом поиске требуемых параметров фильтра на многомерном пространстве допустимых решений. Критерием поиска при этом является соответствие совокупного текущего функционирования фильтра его требуемому функционированию. Современные алгоритмические комплексы минимизации позволяют решать такую задачу весьма надежно и эффективно при выполнении всех внешних требований и ограничений к работе проектируемого устройства. Это дает возможность существенно повысить качество проектируемого фильтра и сократить время его разработки. Материалы, приведенные в статье, показывают, что в сравнении с традиционными классическими подходами синтез узкополосных фильтров методами нелинейного программирования позволяет:

1. Осуществлять синтез по совокупности требуемых характеристик, причем можно легко управлять приоритетом функциональных характеристик в процессе синтеза фильтра.
2. Форма характеристик может быть произвольной.
3. Возможна широкая фрагментация характеристик, когда важные их участки выделяются в отдельное функциональное окно для обеспечения их детальной проработки в ходе синтеза.

Целевые функции в задачах многофункционального синтеза узкополосных фильтров имеют весьма сложный, полимодальный характер. Минимизация таких функций является весьма непростой задачей. Тем не менее разработанный программно-алгоритмический комплекс успешно справился с ней, показав высокую надежность и эффективность. ■

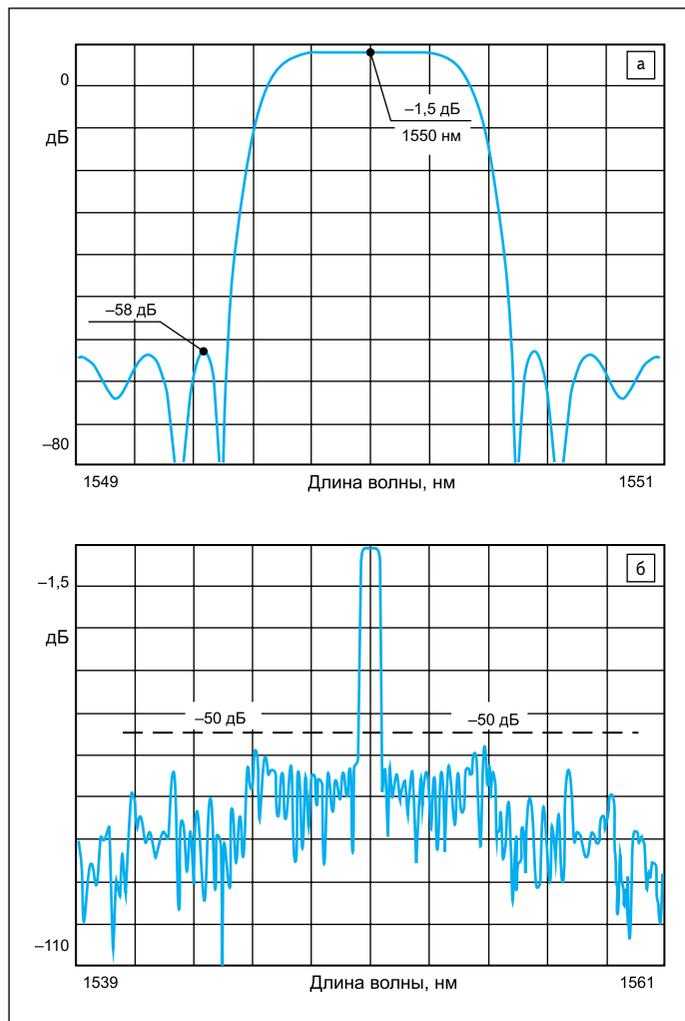


Рис. 4. АЧХ фильтра с числом звеньев $N = 16$: а) в узком диапазоне; б) в широком диапазоне

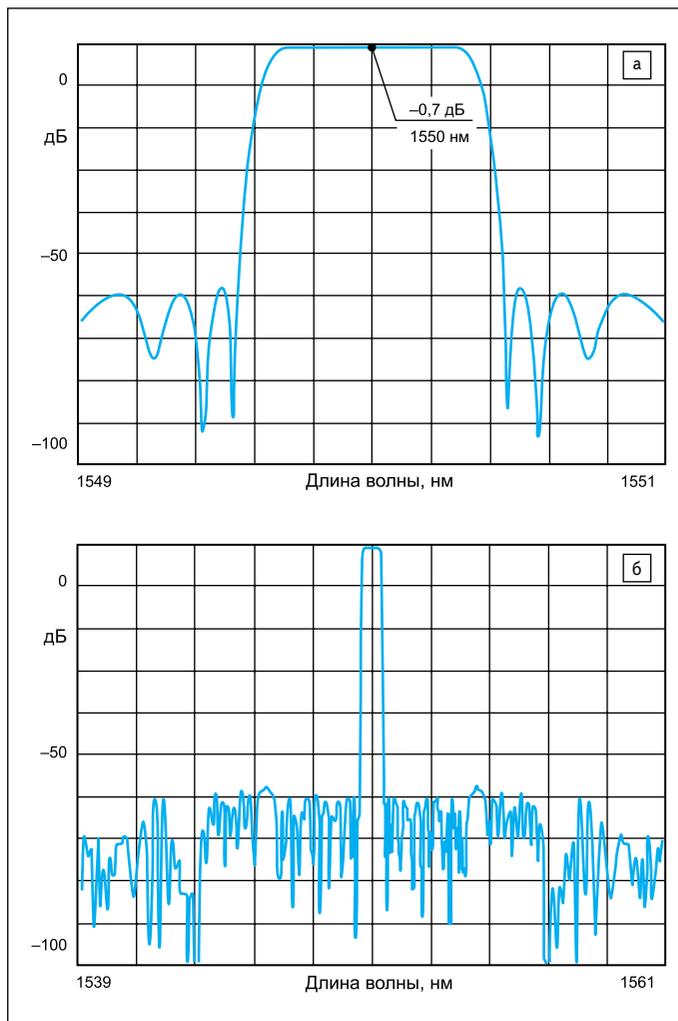


Рис. 5. АЧХ фильтра с числом звеньев $N = 24$: а) в узком диапазоне; б) в широком диапазоне

Литература

1. Bilodeam F., Johnson D. C., Theriault S., et al. An all-fiber dense-wavelength multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings // IEEE Photonics technology letters. 1995. № 4.
2. Williams J. A. R., Bennion I., Sugden K., Doran N. I. Fiber dispersion compensation using a chirped in-fiber Bragg grating. Electron. Lett. V. 30. 1994.
3. Dianov E. M., Grekov M. V., Bufetov I. A., et al. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre // Electron. Lett. V. 33. 1997. № 18.
4. Archambault J.-L., Grubb S. G. Fiber Gratings in lasers and amplifiers // J. Lightwave Technol. V. 15. 1997. № 8.
5. Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., et al. Fiber Bragg grating // Lightwave Technol. V. 15. 1997. № 8.
6. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. Т. 35. 2005. № 12.
7. Медведков О. И., Королев И. Г., Васильев С. А. Запись волоконных брегговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. М.: Препринт 6 НЦВО при ИОФ РАН им. А. М. Прохорова, 2004.
8. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.
9. Раевский С. Б., Смирнов А. А. Круглый градиентный световод с периодически изменяющимся вдоль оси показателем преломления // Антенны. 2006. Вып. 5 (108).
10. Erdogan T. Fiber grating spectra // J. Lightwave Technol. V. 15. 1997. № 8.
11. Будурис Ж., Шеневье П. Цепи сверхвысоких частот. М.: Советское радио, 1979.
12. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, 1990.
13. Войнов Б. С., Бугров В. Н., Войнов Б. Б. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений. М.: Наука, 2007.