

УДК 621.372

ББК 39.56

П542

Д. О. Поляков

Москва, Россия

ФИЛЬТРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

В статье рассматривается вариант синтеза оптимальных фильтров случайных пространственных сигналов на основе многослойных оптических структур, работающих в режиме угловой фильтрации.

Ключевые слова: угловая фильтрация; синтез; оптическая структура.

D. O. Polyakov

Moscow, Russia

FILTERING OF OPTICAL SIGNALS BASED ON MULTI-LAYERED STRUCTURES

The article discusses synthesis of optimal filters for random spatial signals based on multi-layer optical structures running in the corner filtering mode.

Key words: corner filtering; synthesis; optical structure.

В настоящее время ни одна отрасль науки и техники не обходится без применения информационно-измерительных систем, обеспечивающих измерение различных физических параметров.

Одним из важнейших требований при проведении измерений является обеспечение высокой точности, нередко характеризуемой погрешностями в единицы и даже доли процентов. В этой связи возрастает роль когерентных оптических

методов и средств, которые обеспечивают наиболее высокую точность измерений. Все это приводит к широкому распространению оптических информационно-измерительных систем, которые в настоящее время позволяют решать задачи наведения и сопровождения подвижных объектов, дальнометрии, локации, навигации, контроля характеристик атмосферы, измерения геометрических и физических параметров тел, опознавания образов и многого другого [Васин, 1998].

Анализ современных оптических измерительных систем показывает существование резкого противоречия между их потенциальными возможностями и достигнутым уровнем качественных показателей. Например, погрешности углоизмерительных систем составляют единицы угловых секунд при предельной погрешности когерентных систем, не превышающей сотых и тысячных долей угловой секунды [Васин, 1999; Аникст, 1987]. Основными причинами этого являются неоптимальность используемых алгоритмов функционирования и несовершенство элементной базы. Так, некогерентное излучение не позволяет эффективно использовать оптические методы обработки информационных сигналов, а высокоточные когерентные интерференционные системы в реальных условиях эксплуатации оказываются незащищенными от воздействия оптических помех и шумов, нестабильности пространственно-угловых характеристик лазеров. Кроме того, резерв повышения чувствительности и точности оптических систем на основе частотно-избирательных интерференционных структур практически исчерпан, поскольку увеличение коэффициентов отражения зеркал ограничено поглощением и рассеянием в многослойных структурах, а увеличение длины оптического резонатора приводит к влиянию целого ряда дополнительных дестабилизирующих факторов.

Для устранения или уменьшения влияния перечисленных факторов привлекаются новые физические явления и когерентные методы обработки. Одним из таких сравнительно новых явлений, использующим когерентные свойства лазерного излучения, является РУФ волновых полей в РМОС, которая принципиально

позволяет достичь нового, более высокого, уровня точности измерительных информационных систем [Васин, 1998]. Однако создание информационных систем с привлечением РМОС в режиме РУФ сопряжено с такими трудностями, как учет влияния оптических шумов и помех на характеристики измерительных систем, отсутствие чётких алгоритмов анализа и синтеза нерегулярных (с изменяющимися в пространстве параметрами) РМОС.

В связи с изложенным, большую актуальность приобретает научно-техническая задача разработки математических моделей и методик синтеза оптимальных радиооптических устройств ИИС.

Многослойные оптические структуры представляют собой систему из чередующихся слоев с различными оптическими параметрами. В условиях, когда некоторые из слоев работают в режимах, близких к полному внутреннему отражению (ПВО) или нарушенному ПВО, многослойные структуры обладают резкой зависимостью оптического пропускания (отражения) от угла падения излучения. При этом угловая полоса пропускания подобных структур может составлять десятые и даже сотые доли угловой секунды.

Решение задач фильтрации оптических сигналов состоит в выделении информационного оптического сигнала на фоне случайных помех и шумов. Основными элементами оптических информационно-измерительных систем, позволяющих произвести фильтрацию, являются согласованные или оптимальные фильтры.

Согласованные фильтры на основе нерегулярных структур (с изменяющимися в пространстве параметрами) обладают большими возможностями по сравнению с регулярными устройствами, поскольку могут быть синтезированы практически для любых АФР входных сигналов. Однако нерегулярные РМОС не являются пространственно-инвариантными устройствами.

Оптимальные пространственно-угловые фильтры можно представить в виде последовательного соединения двух звеньев. Первое из них играет роль согласованного фильтра, обеспечивая преимущественное пропускание спектральных угловых составляющих, представленных в спектре полезного сигнала. Второе

звено является помехоподавляющим. Степень подавления каждой из угловых спектральных составляющих фона в этом звене обратно пропорциональна их интенсивности в спектре помехи на входе. Благодаря этому, помехоподавляющий фильтр производит выравнивание спектра фона, приводя его к белому шуму. Роль этого звена тем больше, чем больше радиус корреляции фона.

Общая математическая модель для синтеза оптимальных фильтров – это интегральное уравнение вида [Баскаков, 1988]:

$$\int_a^b \int_c^d h(x', y') B(x - x', y - y') dx' dy' = S(x_0 - x, y_0 - y), \quad (1)$$

где $h(x, y)$ – импульсная характеристика оптимального фильтра; $B(x, y)$ – корреляционная функция помехи-шума; $S(x, y)$ – входной сигнал; x_0, y_0 связаны с положением полезного сигнала относительно начала координат; a, b, c, d – координаты границ пространственного сигнала по осям x и y соответственно.

Задача синтеза значительно упрощается при переходе в уравнении (1) к бесконечным пределам интегрирования, что позволяет использовать преобразования Фурье и Лапласа для получения решения в явном виде. Однако подобные фильтры будут квазиоптимальными, поскольку не учитывают ограниченность реальных пространственных сигналов.

Спектральная характеристика квазиоптимального пространственно-углового фильтра $h(p)$ может быть определена на основе анализа прохождения полезного сигнала $A(x)$ и помехи-шума $N(x)$ через РМОС.

Изображения сигнала $A(p)$ корреляционной функции помехи $N(p)$ и спектральной характеристики квазиоптимального фильтра $h(p)$ могут быть представлены в виде дробно-рациональных функций:

$$A(p) = \frac{b(p)}{g(p)};$$

$$N(p) = \frac{n(p)}{m(p)};$$

$$h(p) = \frac{B(p)}{G(p)},$$

где степени многочленов в числителях меньше или равны степеням соответствующих многочленов в знаменателях.

Выражение

$$A_{\text{сиг}}(p) = A(p)h(p) = \frac{b(p)B(p)}{g(p)G(p)}$$

описывает спектр полезного сигнала на выходе фильтра. Максимальное пропускание полезного сигнала будет иметь место в том случае, если выходной спектр вещественный, т. е. все угловые спектральные составляющие синфазные, что соответствует сопряженности корней $g(p)$ и $G(p)$. Максимальное подавление помехи, прохождение которой через систему описывает выражение

$$N_{\text{сиг}}(p) = N(p)h(p) = \frac{n(p)B(p)}{m(p)G(p)},$$

соответствует случаю, когда спектральные составляющие помехи совпадают с корнями спектральной характеристики фильтра, т. е. $B(p_j) = m(p_j)$.

С учетом вышесказанного, спектральная характеристика квазиоптимального фильтра, который сможет обеспечить одновременно и максимальное пропускание полезного сигнала, и максимальное подавление помехи, должна иметь вид:

$$h(p) = \frac{m(p)}{g^*(p)}.$$

Но синтез фильтров по данной методике часто не дает единственного решения, поскольку полиномы $B(p)$ и $G(p)$ могут иметь дополнительные корни, т. е. их порядок может быть выше, чем порядок полиномов $g(p)$ и $m(p)$ соответственно. Поэтому общее решение может быть представлено в виде:

$$h(p) = \frac{m(p)B(p)}{g(p)G(p)}, \quad (2)$$

где полиномы $B_1(p)$ и $G_1(p)$ учитывают возможность существования дополнительных корней.

Синтезируем структуры квазиоптимальных фильтров для некоторых характерных случаев.

1. Входной сигнал типа синфазной экспоненты $A(x)=A_0e^{\beta x}$, $x \geq 0$ на изотропном фоне с функцией пространственной когерентности

$$\Gamma(r) = \Gamma_0 e^{\left(\frac{-r}{\rho_0}\right)},$$

где ρ_0 – радиус когерентности.

Определив изображение полезного входного сигнала, спектр мощности помехи и, представив их в виде дробно-рациональных функций в соответствии с (2), определяем спектральную характеристику квазиоптимального фильтра:

$$h(p) = \frac{2\alpha\Gamma_0(\alpha^2 - p^2)B_1(p)}{(\beta - p)G_1(p)}, \quad (3)$$

где $\alpha = 1/\rho_0$.

Полиномы $B_1(p)$ и $G_1(p)$ необходимо выбрать таким образом, чтобы обеспечить общую степень полинома числителя не выше общей степени полинома знаменателя. Поэтому можно принять $2\alpha\Gamma_0B_1(p) = B_0$ и $G_1(p) = (\gamma^2 - p^2)$ при $\gamma \neq \alpha, \beta$.

Общее изображение импульсной характеристики приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} h(p) &= \frac{B(\alpha - p)}{(\gamma - p)(\beta - p)} = B \frac{1}{(\beta - p)} \cdot \frac{(\alpha - p)}{(\gamma + p)} \cdot \frac{(\alpha + p)}{(\gamma - p)} = \\ &= B \cdot h(p) \cdot h(p) \cdot h(p). \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (4) квазиоптимальный фильтр включает три последовательно включенных звена: правостороннюю полосно-пропускающую РМОС; правостороннюю несимметричную полосно-пропускающую РМОС в режиме отражения; левостороннюю несимметричную полосно-пропускающую РМОС в режиме отражения.

Первое звено осуществляет накопление полезного сигнала, а второе и третье звенья выполняют помехоподавляющую функцию для изотропного фона.

Для спадающей экспоненты на изотропном фоне функциональная схема будет отличаться первым звеном (левосторонняя полосно-пропускающая РМОС).

2. Двусторонний синфазный экспоненциальный сигнал $A(x)=A_0e^{-\beta x}$ на изотропном фоне.

Спектральная характеристика квазиоптимального фильтра, полученная аналогично предыдущему примеру, имеет вид:

$$h(p) = \frac{(\alpha^2 - p^2)}{(\beta^2 - p^2)} = \frac{(\alpha - p)}{(\beta + p)} \cdot \frac{(\alpha + p)}{(\beta - p)} = h_1(p) \cdot h_2(p). \quad (5)$$

В соответствии с (5) квазиоптимальный фильтр включает в себя две полосно-пропускающие несимметричные РМОС в режиме отражения с противоположными направлениями фильтрации и определенными параметрами α и β . Каждое звено выполняет функции помехоподавления и накопления энергии полезного сигнала.

Для осуществления синтеза оптимальных фильтров случайных пространственных сигналов необходимо уточнить форму интегрального уравнения синтеза.

В отличие от временных процессов, ограниченных точкой начала отсчета и протекающих только в одном направлении, пространственные процессы принципиально могут протекать на бесконечном интервале по каждой координате в двух противоположных направлениях (системы с двусторонней памятью). В этом случае интегральное уравнение синтеза на бесконечном интервале имеет вид:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x', y') \Gamma_{\Sigma}(x - x', y - y') dx' dy' = \Gamma_c(x, y) \quad (6)$$

$$-\infty < x' < \infty; \quad -\infty < x < \infty;$$

$$-\infty < y' < \infty; \quad -\infty < y < \infty,$$

где $\Gamma_c(x, y)$ – функция когерентности случайного информационного сигнала; $\Gamma_{\Sigma}(x, y)$ – функция когерентности смеси информационного сигнала и помехи-шума.

В одномерном случае интегральное уравнение синтеза имеет вид:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(x') \Gamma_{\Sigma}(x - x') dx' = \Gamma_c(x) \quad (7)$$

$$-\infty < x' < \infty; \quad -\infty < x < \infty.$$

Поскольку функции, входящие в уравнение (7), в общем случае являются двусторонними, то уравнение (7) по форме можно отнести к интегральным уравнениям типа свертки с двумя ядрами.

Уравнение (7) может быть интерпретировано следующим образом: при поступлении на вход оптимального фильтра двухстороннего сигнала $\Gamma_{\Sigma}(x)$, содержащего информационную и шумовую составляющие, на выходе присутствует только первая составляющая. Это возможно, если шумовой сигнал описывается «непроходящей» функцией для импульсной характеристики фильтра $h(x)$. При известной корреляционной функции помехи это позволяет исходно синтезировать структуру оптимального фильтра. Алгоритм синтеза фильтра имеет следующий вид:

- по известным оригиналам функций когерентности полезного сигнала $\Gamma_c(x, y)$ и помехи $N(x)$ определяются изображения $\Gamma_c(p)$ и $N(p)$;
- определяется изображение смеси сигналов $\Gamma_{\Sigma}(x) = \Gamma_c(p) + N(p)$;
- вычисляется спектральная характеристика фильтра $h(p) = \Gamma_c(p) / \Gamma_{\Sigma}(x)$;
- по известной спектральной характеристике фильтра, используя двустороннее преобразование Лапласа, определяется его импульсная характеристика $h(x)$.

В заключение необходимо отметить, что пространственные системы фильтрации, построенные на основе регулярных резонансных многослойных оптических структур, реализованы для ограниченного числа оптических сигналов. Технологии систем пространственной фильтрации на основе нерегулярных РМОС совершенствуются. Их применение позволит улучшить качественные характеристики измерительных систем.

Библиографический список

1. Аникст Д. А. Высокоточные угловые измерения. / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин и др.; под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 1988. 448 с.
3. Васин С. А. Радиооптические системы пеленгации на основе резонансных структур с угловой избирательностью: монография / С. А. Васин, Ю. А. Покровский, А. Я. Паринский. Тула: ТулГУ, 1998. 177 с.

4. *Vasin S. A.* Методы аналитического синтеза информационно-измерительных и информационно-управляющих устройств и систем с двухсторонней памятью: монография / С. А. Васин, Ю. А. Покровский, Е. А. Макарецкий. Тула: ТулГУ, 1999. 310 с.

References

1. *Anikst D. A.* (1987). Highly accurate angular measurements/ D. A. Anikst, K. M. Konstantinovich, I. V. Mes'kin et al.; ed. by Ju. G. Jakushenkov. M.: Mashine-building, 1987. 480 p. (in Russian).

2. *Baskakov S. I.* (1988). Radiotechnical circuits and signals. M.: Higher school, 1988. 448 p. (in Russian).

3. *Vasin S. A.* (1998). Radio-optical direction-finding systems based on resonance structures with angular selectivity: monograph / S. A. Vasin, Ju. A. Pokrovskij, A. Ja. Parinskij. Tula: TulSU, 1998. 177 p. (in Russian).

4. *Vasin S. A.* (1999). Methods of analytical synthesis of information-measurement and -management devices and systems with dual-sided memory: monograph / S. A. Vasin, Ju. A. Pokrovskij, E. A. Makareckij. Tula: TulSU, 1999. 310 p. (in Russian).