

О.Б. Васильев, А.П. Коваленко

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПЕРВИЧНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается методика квазиоптимальной фильтрации спектрофотометрической информации. При приеме аддитивной смеси сигнала и «белого» шума частотная характеристика фильтра определяется частотным спектром полезного сигнала. Используется модель сигнала, построенная на основе внеатмосферного распределения по спектру солнечной радиации и реальной аппаратной функции спектрального прибора. Оценка частотной спектральной плотности указанной модели сигнала дает в качестве квазиоптимального фильтра в классе линейных систем фильтр Гаусса. Получена зависимость параметра фильтра от стандарта шума. Эффективность применения фильтра Гаусса оценена по результатам реального эксперимента.

1. Введение

При проведении спектрофотометрических измерений солнечной радиации в земной атмосфере (или гидросфере) в некоторых случаях приходится иметь дело со слабыми световыми потоками, что приводит к малому отношению сигнал-шум на выходе спектрального прибора и создает дополнительные трудности в интерпретации получаемых результатов. Аналогичные проблемы возникают, если параметры, которые необходимо определить в результате эксперимента, имеют величины, соизмеримые со случайными погрешностями измерений (например, спектральные потоки лучистой энергии в атмосфере, являющиеся малыми вторыми разностями измеряемых потоков). В настоящей работе предпринята попытка уменьшения случайных погрешностей получаемых данных с использованием при обработке первичной информации априорно известных статистических характеристик сигнала и шумов спектрофотометрической аппаратуры.

2. Спектральная информационно-измерительная система для исследования спектральных коротковолновых характеристик атмосферы и водной среды (СИИС)

Спектральная информационно-измерительная система разработана и изготовлена в лаборатории коротковолнового излучения атмосферы НИИ Физики ЛГУ при непосредственном участии авторов данной работы [1]. Основными элементами системы являются спектрофотометр К-3 и мини-ЭВМ «Электроника ДЗ-28». Укрупненная структурная схема СИИС приведена на рис. 1. Спектрофотометр К-3 позволяет измерять солнечное излучение в диапазоне 0,3–1,0 мкм. Угол поля зрения равен 2°×10' при измерениях яркости неба и подстилающей поверхности и 180° — при измерениях потоков излучения. Время сканирования всего спектрального диапазона 7 с.

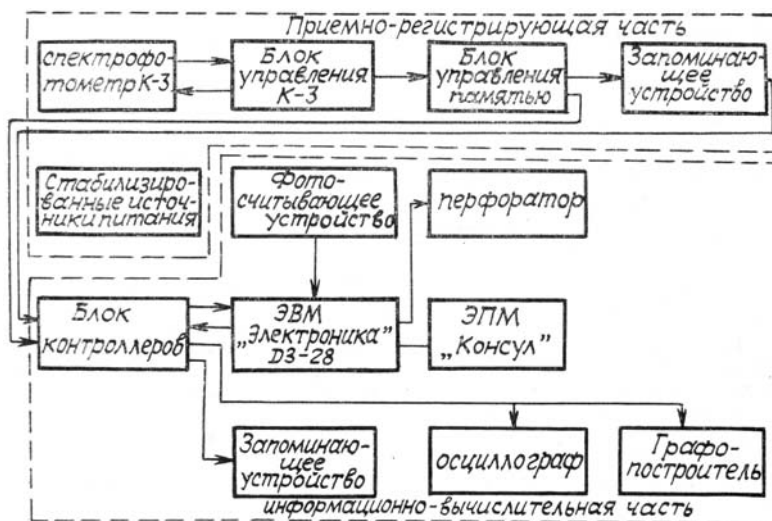


Рис. 1. Структурная схема СИИС

Монохроматор спектрофотометра построен по вертикально-симметричной схеме. Диспергирующим элементом является дифракционная решетка, имеющая 600 штрихов/мм. Дисперсия монохроматора на выходной щели — 55 Å/мм. Эффективная спектральная ширина щели монохроматора порядка 18 Å. Существует возможность ослаблять подаваемые на регистрацию сигналы в ~ 1000 раз с помощью аттенуаторов, имеющих 10 ступеней. Узел автоматики позволяет производить автоматическую запись одного цикла измерений, а также производить попеременную запись внешнего сигнала или сигнала от внутреннего эталонного источника. В СИИС входят, кроме серийно выпускаемого периферийного оборудования, контроллеры, позволяющие вводить информацию в ЭВМ непосредственно со спектрофотометра или с запоминающего устройства, используемого для регистрации информации в полевых условиях, а также позволяющие выводить первично обработанные данные для записи на магнитную ленту или перфоленгу (для дальнейшей обработки) и на осциллограф или графопроектор (для визуального контроля или графического документирования).

3. Методика первичной обработки информации

Разработка методики строилась на основе предположения, что полезный сигнал и шум статистически независимы и взаимодействуют аддитивно. Для применения методов оптимальной линейной фильтрации при обработке получаемой информации необходимо иметь оценки спектра (в радиотехническом смысле) полезного сигнала и шума [2].

Для оценки статистических характеристик полезного сигнала при атмосферных исследованиях предлагается модель, сформированная в соответствии с выражением

$$I(\lambda) = \{[I_0(\lambda) \cdot T(\lambda)] * A\} \cdot \chi(\lambda), \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ — значение сигнала при регистрации солнечной радиации на выходе спектрофотометра; $I_0(\lambda)$ — внеатмосферное значение солнечной радиации; $T(\lambda)$ — функция пропускания земной атмосферы; A — аппаратная функция спектрофотометра, аппроксимируемая кривой Гаусса ($A = e^{-\lambda^2/2\alpha^2}$, где α — некоторый параметр); $\chi(\lambda)$ — спектральная чувствительность спектрофотометра.

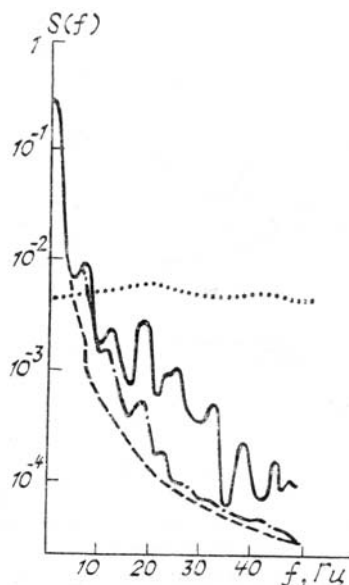


Рис. 2. Спектральные плотности модели сигнала (при различной полуширине аппаратной функции) и шума СИИС: сплошная кривая — внеатмосферное значение солнечной радиации I_0 ; штриховая — $I_0 * A$ ($A/2 = 7$ нм); штрихпунктирная — $I_0 * A$ ($A/2 = 2,5$ нм); точки — шум

Для модели сигнала были использованы внеатмосферные значения солнечной радиации, приведенные в [3] и соответствующие длинам волн по градуировке спектрофотометра К-3 в диапазоне 310—430 нм. Этот участок спектра выбран из следующих соображений:

- 1) диапазон соответствует УФ участку спектрофотометра;
- 2) участок спектра более «изрезан» фраунгоферовыми линиями по сравнению с другими, имеет большое количество крутых фронтов и перепадов, следовательно, его энергетический спектр должен лежать в более высокочастотной области, что, в свою очередь, позволит методы выделения полезного сигнала в этом участке распространить на остальные участки;
- 3) шумы спектрофотометра в этом участке спектра имеют достаточно высокое σ .

На практике функция $T(\lambda)$ в модель сигнала не вводилась. Таким образом, исследуемая модель представляла собой значения солнечной радиации, как бы измеренные реальным спектрофотометром К-3 на верхней границе атмосферы. В модель сигнала может быть добавлено молекулярное поглощение в полосах O_3 (а также O_2 и H_2O в других участках спектра), но, во-первых, величины коэффициентов поглощения зависят от параметров атмосферы, которые, как правило, заранее нам не известны, а, во-вторых, учет поглощения может изменить статистические характеристики сигнала, в частности энергетический спектр, только в более низкой области частот.

Таблица 1

Линейная система	Аналитическое выражение
Низкочастотный RC-фильтр	$e^{-\alpha \tau } \quad \alpha = \frac{1}{RC}$
Два низкочастотных RC-фильтра	$(1 + \alpha \tau) e^{-\alpha \tau }$
Три низкочастотных RC-фильтра	$(1 + \alpha \tau + \frac{\alpha^2\tau^2}{3}) e^{-\alpha \tau }$
Гауссов низкочастотный фильтр	$e^{-\alpha\tau^2}$
Идеальный низкочастотный фильтр	$\frac{\sin \Delta\omega\tau}{\Delta\omega\tau}$

Спектральная (частотная) плотность модели полезного сигнала оценивалась по формуле

$$S(f) = 2\Delta T \sum_{K=0}^m R(K\Delta T) W(K\Delta T) \cdot \cos 2\pi f K \Delta T, \quad (2)$$

где $R(K\Delta T)$ — автокорреляционная функция; $W(K\Delta T)$ — спектральное окно [4], используемое для сглаживания выборочного спектра с целью уменьшения дисперсии оценки. По выражению (2) оценивалась и спектральная плотность шумов сквозного тракта СИИС, записанных при отсутствии входного сигнала на всех усилениях. На рис. 2 представлены полученные оценки спектральной плотности шума и модели полезного сигнала при различной полуширине аппаратной функции. Из рис. 2 видно, что шум в диапазоне частот, в котором спектральная плотность полезного сигнала падает практически до нуля, имеет постоянную спектральную плотность и, следовательно, может быть классифицирован как «белый».

Известно [5], что при приеме аддитивной смеси сигнала и белого шума частотная характеристика фильтра полностью определяется спектром входного сигнала. Так как получить аналитическое выражение спектральной плотности полезного сигнала не представляется возможным, имеет смысл говорить о квазиоптимальной фильтрации. По виду спектральной плотности полезного сигнала можно предположить, что оптимальный фильтр следует искать среди линейных систем. В табл. 1 приведены характеристики некоторых фильтров, с помощью которых осуществлялось сглаживание сигнала.

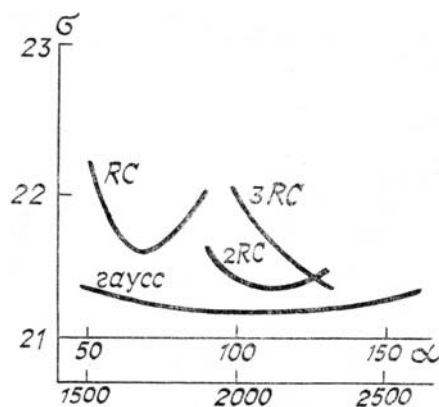


Рис. 3,а. Результативность сглаживания информации различными фильтрами при $\sigma_m = \text{const}$

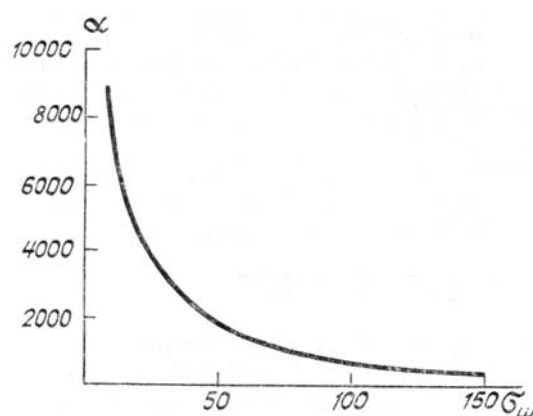


Рис. 3,б. Зависимость оптимального параметра фильтра Гаусса α от среднеквадратического отклонения шума σ_m

Окончательная модель сигнала, на которой проверялись сглаживающие свойства того или иного фильтра, имеет следующий вид:

$$I(\lambda) = \{[I_0(\lambda) \cdot T(\lambda)] * A\} \cdot x(\lambda) + n(\lambda), \quad (3)$$

где $n(\lambda)$ — реальный шум спектрофотометра со своими статистическими характеристиками (дисперсией, средним среднеквадратическим отклонением). Следует отметить, что поскольку используемые фильтры [4] представляют собой линейные системы, операцию сглаживания (цифровую низкочастотную фильтрацию) можно осуществлять при помощи операции свертки, т.е.

$$I(\lambda) = I(\lambda) * \Phi(\lambda). \quad (4)$$

Результаты сглаживания различными фильтрами (рис. 3,а) по критерию минимума среднеквадратической ошибки показали, что несколько лучший результат по сравнению с остальными дает применение фильтра Гаусса, хотя вряд ли это различие можно считать статистически значимым. Правда, меньшая критичность к значению параметра также говорит в пользу фильтра Гаусса.

На рис. 3,б приведена полученная экспериментально зависимость оптимального (по критерию минимума среднеквадратической ошибки) параметра фильтра Гаусса α от начального среднеквадратического отклонения шума. Приведенная на рис. 3,б кривая позволяет, зная статистические характеристики шума данного экземпляра спектрофотометра, заложить конкретные параметры фильтра в программу обработки первичной информации.

4. Эффективность применения методики обработки, учитывающей статистические характеристики сигнала и шума

Для оценки практической результативности предлагаемой методики на одном из экземпляров спектрофотометра К-3 были получены регистрограммы потока излучения от эталонной лампы СИ-10. Для оценки оптических характеристик были произвольно выбраны несколько длин волн в разных участках диапазона и при различных усилениях. Было произведено по 10 записей спектров при каждом усилении, т.е. при различных отношениях сигнал-шум. Запись производилась при 2560 точках отсчета на весь диапазон длин волн. В дальнейшем обработка производилась по двум вариантам. В первом из всего массива выбирались 640 точек, т.е. регистрограмма приводилась к стандартному варианту, в котором обычно происходит выполнение эксперимента (без сглаживания полученных экспериментальных данных с помощью какого-либо фильтра). По этим значениям и вычислялись среднеарифметическое значение, дисперсия и стандарт.

Во втором варианте прежде чем привести регистрограмму к стандартному варианту (640 точек), для всех регистрограмм была применена фильтрация Гауссовым фильтром с параметром, определенным по кривой, изображенной на рис. 3 б, в зависимости от коэффициента усиления (среднеквадратического отклонения шума). Затем была проделана та же процедура, что и в предыдущем варианте, т.е. из отфильтрованного сигнала были выбраны 640 точек и определены среднеарифметическое значение, дисперсия и стандарт для каждой из выбранных длин волн. Сравнительные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

λ , мкм	σ/\bar{F} , %	$K=6$	σ/\bar{F} , %	$K=9$
	исходный сигнал	сглаженный сигнал	исходный сигнал	сглаженный сигнал
0,735	13,5	7,8	24,7	5,9
0,755	12,8	3,1	20,4	5,8
0,823	7,2	4,8	20,3	4,9
0,920	13,1	7,2	24,8	7,5

Из анализа табл. 2 видно, что применение цифровой фильтрации дает заметный выигрыш, особенно в центре диапазона, где большие значения сигнала (и, соответственно, большее отношение сигнал-шум). Так, на длине волны $\lambda = 735$ нм происходит уменьшение среднеквадратического отклонения приблизительно в 2 раза при $K = 6$ и приблизительно в четыре раза при $K = 9$, а на длине волны $K = 823$ нм соответственно примерно в 2 и в 6 раз.

В июле 1987 г. на оз. Красном Ленинградской обл. был проведен эксперимент по измерению падающих ($F\downarrow$) и восходящих ($F\uparrow$) потоков солнечной радиации на различных глубинах H в водной среде. В эксперименте в качестве входного устройства использовался стекловолоконный жгут (который и опускался под воду) с приемной поверхностью из молочного стекла типа МС-13. Система опроса

спектрофотометра позволяла получать 2560 отсчетов на весь спектральный диапазон длин волн (350÷950 нм). Увеличение числа точек в 4 раза позволяет в дальнейшем при обработке получить более высокую точность, так как известно [6], что получение избыточных измерений в однородной серии позволяет уменьшить случайную погрешность результата. Примененное число отсчетов ограничено техническими возможностями принципиальной схемы спектрофотометра К-3. Для иллюстрации в данной работе выбраны две серии наблюдений (произведенные 22 июля 1987 г.) падающего потока $F\downarrow$. Измерения были выполнены при отсутствии облаков и при отсутствии сильного волнения на водной поверхности, т.е. внешние условия для появления дополнительной случайной погрешности были исключены.

Полученные на каждой площадке данные наблюдений сглаживались фильтром Гаусса с параметром α , определенным по кривой (рис. 3 б) зависимости $\alpha = f(\sigma)$. Из исходного сигнала и из отфильтрованных данных наблюдений были выбраны значения, соответствующие определенным по спектральной градуировке длинам волн λ_i .

На рис. 4 представлены кривые $F\downarrow(H)$ для некоторых произвольно выбранных длин волн λ_i . Для оценки результативности применяемой методики, например, по измерению дисперсии (или среднеквадратического отклонения), необходимо полученные зависимости аппроксимировать какой-либо гладкой кривой.

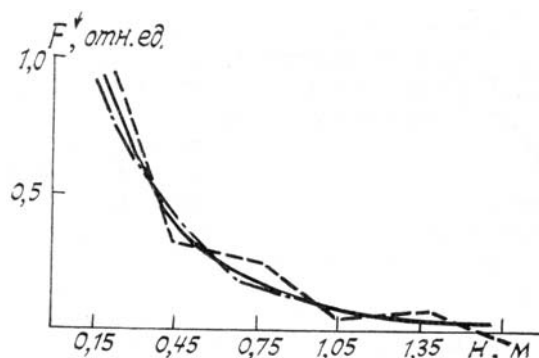


Рис. 4. Вертикальный профиль падающего потока в водной среде для $\lambda = 735$ нм: штриховая кривая — измеренные значения; сплошная — значения, сглаженные с помощью фильтра Гаусса; штрихпунктирная — аппроксимирующая кривая

По внешнему виду полученные кривые можно отнести к экспоненциальной зависимости. Однако, построенные в логарифмическом масштабе, они дают некоторое отклонение от прямой линии в сторону параболы. Поэтому в уравнение прямой пришлось добавить еще один член:

$$y = a + bH + cH^2, \quad (5)$$

где $y = \ln F$, $a = \ln F_0$ (F_0 — значение F при $H = 0$). Полученные аппроксимирующие функции показаны на рис. 4.

Таблица 3

$H, \text{ м}$	$\lambda, \text{ нм}$								
	735			755			823		
	F	F'	F''	F	F'	F''	F	F'	F''
0,15	204	243	175	211	242	183	186	243	161
0,45	70	67,8	82	67	87,2	70,4	65,4	69,8	79,5
0,75	42	49,3	38,7	20,8	5,2	27,2	40,3	39,3	39,2
1,05	15,1	11,3	18,1	10,8	11,2	10,5	20,6	37,3	19,4
1,35	8,4	10,9	8,5	5,2	-3,9	4,0	8,4	12,6	9,5
1,65	4,2	-6,6	3,9	1,4	-3,9	1,6	5,1	-7,9	4,7

В табл. 3 приведены значения $F(H)$: F — значения падающего потока после фильтрации; F' — исходные (наблюденные) значения; F'' — значения, вычисленные с помощью аппроксимирующей функции.

После подбора формул для аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей были вычислены дисперсии D и среднеквадратические отклонения σ исходных и сглаженных (отфильтрованных)

значений относительно значений, вычисленных с помощью аппроксимирующих функций. Полученные значения приведены в табл. 4, где D_1 и σ_1 относятся к исходным значениям, а D_2 и σ_2 — к сглаженным. Значения D и σ даны в относительных единицах.

Таблица 4

λ , нм	D_1	D_2	σ_1	σ_2
735	1028	207	32,1	14,4
755	880	173	29,7	13,1
823	1475	165	38,4	12,9

Из табл. 4 видно, что даже при достаточно грубом подборе аппроксимирующей функции применение цифровой фильтрации позволяет более чем в 4 раза уменьшить дисперсию наблюдаемых данных.

5. Заключение

Итак, выполненные двумя способами оценки эффективности цифровой фильтрации первичной спектрофотометрической информации», сделанные для конкретного экземпляра спектрофотометра К-3, показывают, что на определенных ступенях усиления удастся уменьшить случайные погрешности измерений приблизительно в два раза. Это, в свою очередь, означает, что при проведении натуральных экспериментов в реальной атмосфере станет возможным, во-первых, измерять притоки лучистой энергии в атмосфере с вдвое меньшей погрешностью; во-вторых, изучать их в еще более «чистых» воздушных массах, чем прежде; и, в-третьих, получить их вертикальные профили тогда, когда ранее это невозможно было сделать из-за больших погрешностей экспериментальных данных. Описанная в данной статье методика цифровой фильтрации первичной спектрофотометрической информации в настоящее время внедряется в практику выполнения атмосферно-оптических и подводно-оптических измерений.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность ст. н. с, к. ф.-м. н. В.С. Гришечкину и ведущему инженеру И.А. Товстенко за полезные обсуждения настоящей работы.

1. Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Коваленко А.П. и др. //Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 225–238.
2. Коваленко А.П. //Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ. Вып. 19 (в печати).
3. Поток энергии Солнца и его изменения /Под ред. О. Уайта. М.: Мир, 1980.
4. Отнес Р., Эпоксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.
5. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. М.: Сов. радио, 1980. 544 с.
6. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию
29 ноября 1988 г.

O. B. Vasiliev, A. P. Kovalenko. On the Efficiency of Primary Spectrophotometric Information Filtration.

A method for quasi-optimal filtration of spectrophotometric information is considered. For an additive mixture of a signal and white noise, the frequency characteristic of a filter is determined by the signal spectrum. In the analysis the model of signal is used, which is constructed using extraterrestrial spectrum of solar radiation and the instrumental function of a spectrometer. The assessment of a frequency spectral density of this signal model allows one to arrive at a conclusion that the Gaussian filter can be offered in the class of linear systems, as a quasi-optimal one. The relationship between the filter parameter and noise standard deviation is obtained. The efficiency of this filter use is estimated using the experimental data.