

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ

Ю.А. Полканов

ОБ ОДНОМ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АТМОСФЕРЫ

(Метод нелинейной фильтрации сигнала обратного рассеяния)

Предлагается метод нелинейной фильтрации сигнала, позволяющий сгладить регулярные неоднородности и усилить перепады сигнала, связанные с наличием аномальной неоднородности среды. Сравнение результатов фильтрации (в численном моделировании) с результатами линейной и медианной фильтраций указывает на высокую эффективность предлагаемого метода обработки сигнала. Это подтверждается натурным экспериментом в замутненной среде и при условии турбулентной неоднородности.

1. Введение

Выявление аномальных неоднородностей атмосферы (сопутствующих ее неравновесному состоянию) по сигналу обратного рассеяния импульсного оптического излучения представляет существенный интерес. Это связано как с неоднозначностью и малой точностью методик восстановления оптических характеристик неоднородной среды, так и с большим объемом необходимых вычислений, а следовательно, с трудностями аппаратурной реализации измерительного комплекса для работы в реальном масштабе времени.

Поэтому представляет интерес получение необходимой информации непосредственно из временной структуры сигнала рассеяния, после его определенной предварительной обработки (фильтрации), позволяющей выделять аномальные неоднородности сигнала на фоне определенной структуры, без этапа восстановления оптических характеристик среды по полученному сигналу.

Возможность такого подхода подтверждают данные о прямой связи интенсивности сигнала рассеяния с параметром, пропорциональным функции, описывающей структуру аэрозоля на трассе измерений [1]. Также отмечается, что между формой сигнала рассеяния и характером оптических неоднородностей атмосферы в различных метеосостояниях наблюдается существенная корреляция [2], а изменение метеоситуации приводит к перестройке структуры оптических неоднородностей атмосферы (во многом обусловленных турбулентными процессами), что прямо сказывается на структуре регистрируемого сигнала рассеяния [3]. На основе этих данных была разработана методика выявления оптических аномалий в атмосфере путем анализа временной структуры сигнала обратного рассеяния.

2. Методика

Измерения разделены на фоновые, соответствующие термодинамически устойчивому состоянию атмосферы, когда нет резких изменений оптических характеристик атмосферы, и основные, когда есть оптическая аномалия (топографический объект, облако, турбулентность ясного неба, дым, турбулентная струя).

Методика предусматривает:

1) Использование специальной нелинейной фильтрации, сглаживающей регулярную структуру неоднородностей (детерминированную структуру, описываемую аналитичной во всех точках функцией, в простейшем случае — синусоидой) и обостряющей перепады сигнала, обусловленные нерегулярными (аномальными) неоднородностями в атмосфере (чем круче перепад, тем больше отфильтрованный сигнал в точке перепада) [4].

2) Выделение характерных особенностей поведения сигнала (перепадов ступенчатого типа) на границе неоднородности, включая пограничный слой турбулентной аномалии.

Специальную фильтрацию можно представить определенной последовательностью действий. Цель фильтрации — выделить аномальные неоднородности во временной структуре сигнала рассеяния и определить положение границ таких неоднородностей.

Для этого из отсчетов каждого сигнала формируют пары новых (рабочих) отсчетов путем суммирования одинакового числа исходных значений сигнала, при последовательном возрастании взятого числа исходных отсчетов для пары, проводят ряд преобразований и формируют цифровую последовательность новых отсчетов, амплитуда которых пропорциональна величине перепада отфильтрован-

ного сигнала на шаге дискретизации, когда по максимальному перепаду судят о положении ближайшей границы аномалии сигнала рассеяния, а, следовательно, и об аномалии среды.

Аналитически этот алгоритм можно свести к выражению

$$S_{t_n} = \frac{1}{t_{n/2}} \ln \left(\int_{T_3}^{T_4} S(t) dt / \int_{T_1}^{T_2} S(t) dt \right),$$

где $T_1 = t_0$, $T_2 = t_n$, $T_3 = t_n + t_1$, $T_4 = 2t_n + t_0$ (при $n = 2, 3, \dots, n_x$); $T_1 = t_n$, $T_2 = t_0$, $T_3 = 2t_n^* + t_0$, $T_4 = t_n^* + t_1$ (при $n = n_x + 1, n_x + 2, \dots, n_{\max}$); когда $t_n^* = t_n$, $t_1 = \Delta t$ (шаг дискретизации сигнала по трассе), n_x определяется из условия $|(S_{t_n} - S_{t_n^*})| = \min$.

3. Результаты

Первая проверка эффективности специальной фильтрации проводилась в численном эксперименте при сравнении ее с линейной и медианной фильтрациями [5, 6]. Отличие исследуемой фильтрации — использование при построении алгоритма априорной информации о возможном скачке сигнала обратного рассеяния на шаге его дискретизации (на основе знания характера изменения оптических характеристик реальной атмосферы).

3.1. Численное моделирование

Численное моделирование проводилось на мини-ЭВМ с применением интерактивной системы спектрально-статистической обработки зашумленного модельного сигнала. Использовался экспоненциально-спадающий сигнал с перепадом в центре выборки из 50 отсчетов.

Усреднение для линейной и медианной фильтраций проводилось по трем отсчетам, при одном рекурсивном для медианной фильтрации (3,1). С целью выделения фронта введенного перепада сигнала и оценки его деформации была введена операция повторного поиска максимального перепада отфильтрованного сигнала, после исключения из рассмотрения прежде выявленного перепада.

Критерием эффективности фильтрации служило отношение дисперсий отфильтрованного и исходного (без шумов) сигналов как для всей выборки, так и ее частей до и после перепада.

Пример полученных результатов представлен на рис. 1. Здесь отношения между максимальным сигналом, введенным перепадом, и уровнем шумов взяты соответственно 10:1:10. В этом случае отношение сигнал/шум в точке перепада равно 0,32. Место перепада отмечено меткой (T).

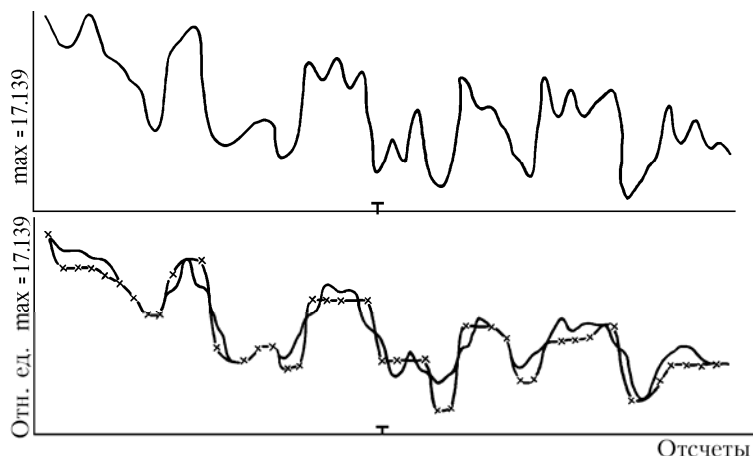


Рис. 1. Исходный сигнал при отношении спад сигнала/шум = 0,1 — верхний график; результаты линейной фильтрации (сплошная линия) и медианной фильтрации (линия со звездочками) — нижний

Результаты специальной фильтрации приведены на рис. 2, где правый график — отфильтрованный сигнал, левый — результаты анализа его «провалов». Сплошная линия соответствует результату повторного поиска, выявляющего перепад более надежно, но смещенного относительно истинного положения перепада. На левом графике дельта-импульсы, соотнесены с максимальным перепадом сигнала в «провале» по амплитуде и положению.

В приведенном примере линейная и медианная фильтрации не эффективны и не позволяют выделить введенного перепада сигнала.

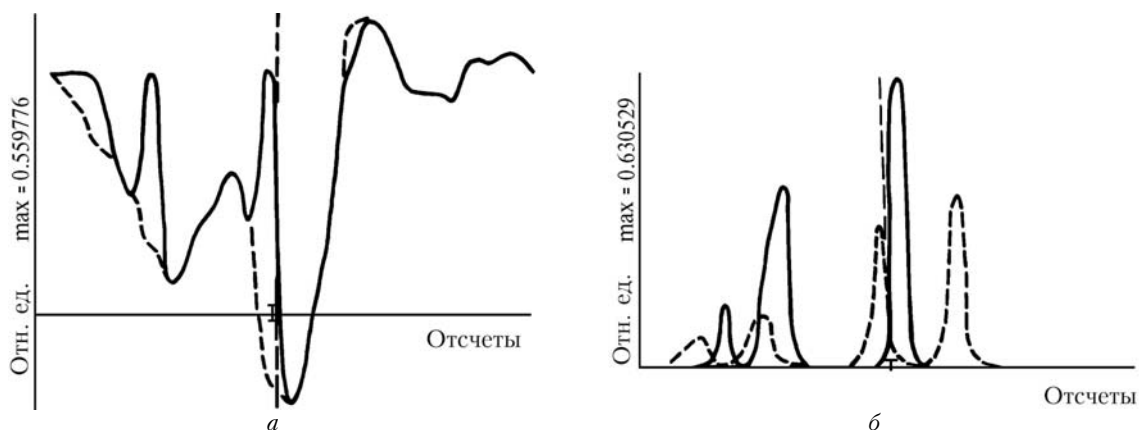


Рис. 2. Результаты исследуемой фильтрации сигнала при отношении сигнал/шум = 0,1: а – сплошная линия соответствует повторной фильтрации; б – результат выделения максимальных перепадов (число отсчетов – $2 \cdot n$)

Общие оценки эффективности фильтрации представлены в таблице, где введены следующие обозначения: LINF – линейный фильтр, MEDF – медианный фильтр, GRAN(0), GRAN(1) – специальная фильтрация (0,1 – число повторных поисков максимальных перепадов отфильтрованного сигнала), DISP1, DISP2 – дисперсии до и после введенного перепада сигнала, SIG1, 2, 3 – сигналы при отношениях между максимальным значением, перепадом и шумом: 10:1:1; 10:1:5; 10:1:10 соответственно.

	SIG 1	DISP 1	DISP 2
LINF	1,021	0,990	1,198
MEDF	1,008	0,992	1,055
GRAN (0)	33,62	15,900	1,055
GRAN (1)	3,738	2,000	2,016
	SIG 2	DISP 1	DISP 2
LINF	1,131	1,198	2,888
MEDF	1,070	1,148	2,492
GRAN (0)	2,438	2,420	1,420
GRAN (1)	4,651	3,148	–
	SIG 3	DISP 1	DISP 2
LINF	1,487	1,494	3,109
MEDF	1,400	1,383	2,893
GRAN (0)	5,193	6,908	3,969
GRAN (1)	4,789	4,320	4,355

В таблице значения дисперсии нормированы относительно дисперсии исходного сигнала. Для специальной фильтрации DISP1 и DISP2 существенно выше единицы, что указывает на нелинейный характер фильтрации, высокую чувствительность к отдельным перепадам сигнала.

3.2. *Натурный эксперимент*

Сигнал обратного рассеяния в натурном эксперименте регистрировался при наличии на трассе зондирования: а) топографического объекта на местности, б) задымления части трассы, г) турбулентной струи. В качестве топографического объекта использована отражающая поверхность с коэффициентом отражения $k \sim 0,3$.

Задымления двух типов создавали условия многократного рассеяния излучения и соответствовали МДВ на десятки метров (в первом случае) и метры (во втором случае).

Турбулентная струя создавалась реактивным двигателем в условиях МДВ в несколько километров.

Сигнал, отраженный от топографического объекта, уверенно регистрировался в отсутствие задымления. Он частично перекрывал поле излучения и экранировал часть трассы зондирования, приводя к определенному перепаду регистрируемого сигнала обратного рассеяния от атмосферы.

В случае даже слабого задымления трассы по полученным сигналам нельзя сделать определенных выводов о наличии или отсутствии отдельной оптической неоднородности на трассе (графики «Сигнал» рис. 3, 4 соответственно, где представлены 18 отсчетов сигнала, соответствующих зоне задымления, при числе точек графика 520).

При достаточной точности измерения сигнала рассеяния специальная фильтрация позволяет получить сигнал, повторяющий ход коэффициента ослабления оптического излучения на трассе и имеющий большую наглядность. Причем признаком аномалии на трассе зондирования служит скачок такого сигнала, не соответствующий изменению сигнала для устойчивой атмосферы в фоновых измерениях.

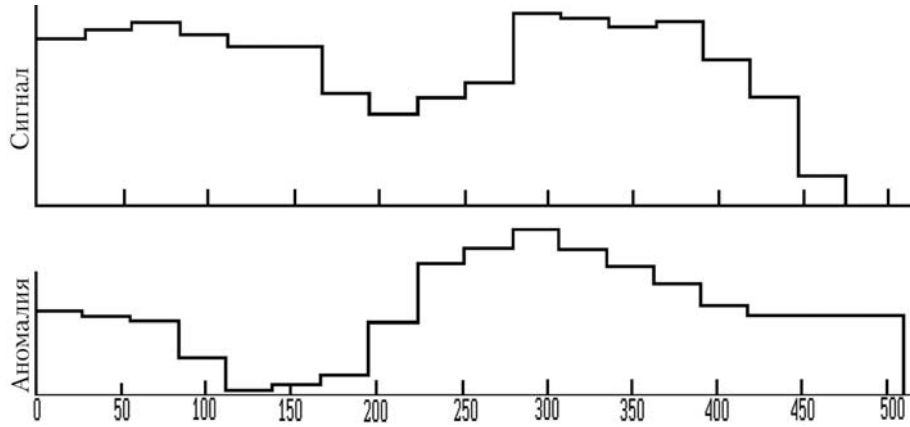


Рис. 3. Сигнал, полученный при метеорологической дальности видимости (МДВ) в десятки метров (слабый дым) – верхний график; результаты специальной фильтрации – нижний

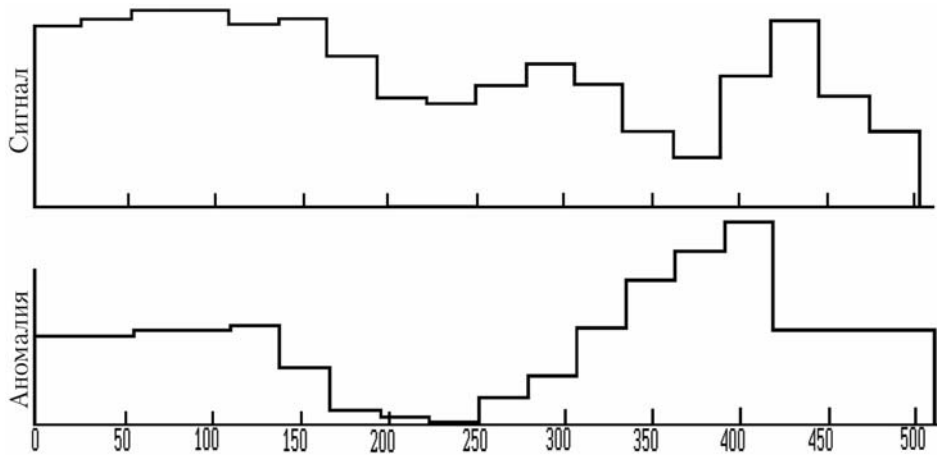


Рис. 4. Сигнал обратного рассеяния от слабого дыма при наличии топографического отражающего объекта – верхний график; результаты специальной фильтрации – нижний

Это явно просматривается в результатах фильтрации сигнала рассеяния (графики «Аномалия» рис. 3, 4 соответственно), где присутствие отражающей поверхности на трассе существенно изменяет общий ход отфильтрованного сигнала – плавный подъем с последующим резким спадом на границе задымления сменяется резким скачком сигнала (на двух отсчетах) на участке, соответствующем положению топографического объекта, при более плавном последующем спаде на границе задымления (из-за эффекта экранирования).

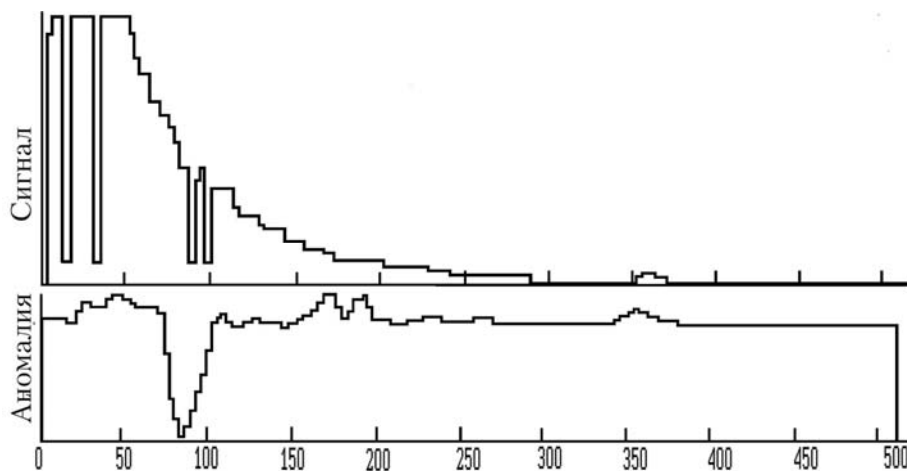


Рис. 5. Сигнал обратного рассеяния от турбулентной струи – верхний график; результаты специальной фильтрации – нижний

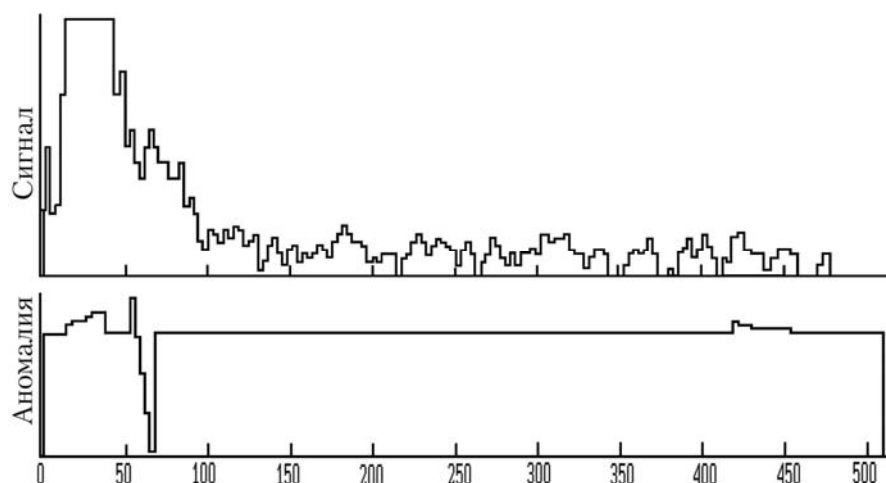


Рис. 6. Сигнал обратного рассеяния от турбулентной струи — верхний график; результат выделения максимальных перепадов — нижний

4. Заключение

Проведенная проверка показала высокую эффективность специальной фильтрации по сравнению с линейной и медианной для задач выявления аномальных неоднородностей в условиях существенной замутненности среды, (численный эксперимент). Натурный эксперимент подтвердил возможность выделения аномалии на фоне определенной структуры атмосферных неоднородностей, носящих псевдорегулярный характер. Такая фильтрация может найти применение для обнаружения турбулентности ясного неба, аэрозольных сгустков и процессов формирования облачности.

1. Задде Г.О., Зуев В.Е., Тарасенко В.П., Юрга Н.И. //Распространение оптических волн в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1975. С. 174–179.
2. Пашенко В.П. //Метеорология и гидрология. 1982. № 5. С. 112–119.
3. Fenn R.W., Shettle E.L., Herring W.S., Johnson R.W. //Atmos. Enviror. 1981. V. 15. № 10–11. P. 1911–1918.
4. Полканов Ю.А. //Авторское свнд-во СССР № 1448907, кл. G01W1/00. Способ определения положения оптической неоднородности атмосферы. Приоритет 01.06.86, опубл. 01.09.88.
5. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры //Под ред. Т.С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. 221 с.
6. Ярославский Л.П. //Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии (Введение в цифровую оптику). М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

НИИ прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
при Белорусском государственном университете

Поступила в редакцию
19 сентября 1991 г.

Yu. A. Polkanov. **A Possibility of Detecting Anomalous Inhomogenities of the Atmosphere.**

A technique of nonlinear filtration of signals is proposed, which allows one to smooth the regular inhomogenities of the signal while amplifying signal drops due to anomalous inhomogenities of a medium. The filtration made using this technique was compared (in numerical experiments) with the linear and median filtration. The comparison showed high efficiency of the proposed filtration technique. This has also been confirmed by the results of filtering the experimental data obtained in a turbid medium and in a medium with turbulent inhomogeneity.