**Применение методов Градиентной Морфологии в анализе космических снимков**

***Балабан Е.Д.1, Романов Д.Р.2***

*Студент1, студент2*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*Физический факультет, Москва, Россия*

E–mail: egor.balaban3@mail.ru, *r0manych2003@yandex.ru*

**Аннотация.** Рассматриваются результаты применения методов Градиентной Морфологии (ГМ) в анализе вихревых образований в атмосфере и океане в космических снимках.

Методы Градиентной Морфологии (ГМ) основаны на Конечно-Мерной Теореме Отсчетов (КМТО), которая позволяет вычислять частные производные от массивов чисел с точностью мантиссы (без использования конечных разностных схем), в частности, вычислять градиентные поля **G**=grad P от скалярных изображений P.

**1D КМТО** (Терентьева): **даны** 3 объекта: массив отсчетов *D=f(x0)* и две матрицы: *H(0)(x0)={**H(0)(k,x0)}* - ФГ в целочисленных точках отсчетов *x0=0:N-1* и *H(n)(x)={Hn0)(k,x)}* - ФГ с n операцией на более мелкой сетке отсчетов *x=0:dx:N-dx, dx<1, k=1:N,* см. Рис.1*.* **Тогда** “непрерывная функция - *dx<1* с операцией *n*” (в одну строку в обозначениях линейной алгебры: верхняя кавычка - транспонирование, а звездочка – умножение матриц)

*f(n)(x**)=(H(0)(x0)\*D****’****)****’****\*H(n)(x), dx<1*

есть при n>0 “n-ая производная”, при n<0 “n-ый интеграл” от массива чисел *D=f(x0)*, а при n=0 *f(0)(x)* проходит через точки выборки *D=f(x0).*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Фурье Гармоники-ФГ  H(0)(k,x0), N=8, dx=1 | Интерполяция ФГ  H(0)(k,x), N=8, dx=0.01 | Дифференцирование ФГ  H(1)(k,x), N=8, dx=0.01 | Интегрирование ФГ  H(-1)(k,x), N=8, dx=0.01 |

***Рис.1***. Пример, слева матрица базиса ФГ (расположены горизонтально, в центре константа, вверх оцифровка косинусов, вниз - синусов), операции дифференцирования n=1 и интегрирования n=-1, базиса ФГ приведены в случае интерполирования dx<1 справа.

Важное замечание по *f(n)(x)*: внутри скобок (*H(0)(x0)\*D****’****)****’*** по правилу умножения “строка-столбец” реализуется **прямое** Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) с результатом – массив коэффициентов Фурье [Ck]**’** в вектор столбце. Еще одно транспонирование [Ck]=([Ck]**’**)**’** возвращает массив [Ck] в строку. В итоге реализуем по правилу одна “строка-столбец” [Ck]\**H(n)(x)* **обратное** ДПФ с результатом, который при n=0 возвращает *D=f*(0)*(x0)=f(x0)* или мы говорим, что результат проходит через точки отсчетов выборки *D*.

В две строки формулпредставляем более сложную **3D КМТО** (Терентьев): **даны** 3 объекта: массив отсчетов *D=f*(*x*0,*y*0, *z*0)*,* и две матрицы Фурье гармоник *H*(0)(k,*x*0), *x*0=0:*N*-1 и *H*(n)(k,*x*), *x*=0 : *dx* : *N*-*dx*, k=1:N, **тогда** “непрерывная” функция (dx <1)





проходит через точки отсчетов *f*(*nx*,*ny*,*nz*)(*x*0, *y*0, *z*0) при nx=ny=nz=0 .

Скалярные произведения (2) реализуют Прямое Преобразование Фурье и Фурье ряд (1) при nx=ny=nz=0 Обратное ПФ с интерполяцией, если dx <1. Смысл значений nx, ny, nz сохраняется для частных производных и операций интегрирования. Т.е. это еще и возможность точно считать многомерные интегралы высокой кратности [1].

Отсюда градиент от 3D массива чисел *D*=*f* (*x*0,*y*0,*z*0):

Аналогично выписывается выражение для операции ротор от трех 3D массивов чисел.

**Схема основных операций ГМ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Поворот вектора gB на угол  f=оgB      **|diR|=1**  gB | **Шаблон** X=[diC]    **|X|=1**  Проекции f на X:  COS: f=>fC=(f,X)\*X,  SIN: f=>fS=f-fC | **Проекции** f на X и реверс  **f** в обл. определенияX  **|X|=1**    fC  f  fS=f-fC  ||fc||2=∑|fc|2, ||fs||2=∑|fs|2 | **Величина** SNR(f|X)=  *=*||fC||2/||fS||2 в центре Х.  Центр Х – в обл. сканир. S.  **Задача локализации: (x0,y0)=**  **=argmaxSNR(f|X), (x,y)**  **F**  Область S – внутри .  **S**  **X** |

***Рис. 2***. Операции над векторными полями, шаблоны, проекции, функция SNR и постановка задачи локализации (шаблона Х) объекта.

**Операции теории поля в пространственной области**

Ниже мы демонстрируем применение ГМ методы в пространственной области на примере слабого бокового вихря. Обращаем внимание на то, операции реализуются с точностью мантиссы. В частотной области лини тока в низкочастотной части образуют вихрь – выделено красной окружностью.

Операциям теории поля можно приписать смысл в частотной области.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| P={Px, Py, Pz}    Vortex P | |P| | rot P | Interpolated  rot (A), dx=1/2 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |rot P| | |div P| | SNR(P)=  =|rot P|/|div| P| | Линии тока F |

***Рис. 3.*** Операцией ротор выделяется слабый боковой вихрь с его осью.

**Локализация лесных пожаров в космических изображениях**

В существующих системах мониторинга пожары детектируются в ИК диапазоне по порогу яркости. Мы выделим две системы: FIRMS (firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/) из NASA и Российскую Scanex ([scanex.ru/](http://www.scanex.ru/)).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| RGB | G | G, pF=0.35 | SNR(f|X)  F  S | maxSNR~6.9  S |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X=[diP] | fc | fs |  | f=grad G | |fc| | |fs| |

***Рис. 4***. Локализация пожаров с дымовыми шлейфами на космических снимках.

**Обсуждение:** Методы градиентной морфологии превосходят на порядок по точности локализации, например, обычные морфологические и корреляционные методы [1]. Для успешной работы методов ГМ требуется настройка (параметров) шаблонов и для фильтрация одиночных точек в исходных изображениях подбор параметр pF>0.

**Актуально:** создание широкого спектра технических устройств со встроенными вычислителями для решения прикладных задач.

**Выводы:** методы ГМ найдут широкие применения в решении задач геофизики, волновой физики, в электродинамике, астрофизике и т.п.

**Литература**

1. Терентьев Е.Н. <https://orcid.org/0000-0003-1024-2575>
2. Терентьев Е.Н., Приходько И.Н., Фаршакова И.И., Кузнецов И.Д., Шилин-Терентьев Н.Е. (2019), Локализация вихрей и дорожных знаков на изображениях, <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-11533-3_>
3. Терентьев Е.Н., Приходько И.Н., Фаршакова И.И. (2019) Проблемы точной локализации объектов в изображениях, AIP Conference Proceedings 2171, 110009 <https://doi.org/10.1063/1.5133243>