



Расчет скоростей распространения плюма реки Бельбек по данным беспилотных летательных аппаратов

Новиков Б.А., Козлов И.Е., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь



1 Введение

С развитием коммерческого рынка беспилотных летательных аппаратов стали появляться новые подходы к их использованию, позволяющие вести мониторинг природной и антропогенной среды. С помощью БПЛА имеется возможность получать материалы высокого разрешения в региональных масштабах, за относительно небольшую стоимость.

В настоящей работе измерения с **оптической и FLIR** камеры, установленной на БПЛА DJI enterprise 2 dual, использовались для изучения динамики плюма реки Бельбек. Река Бельбек является важным природным и хозяйственным водным объектом для г. Севастополя, на ней построен водозабор и проводятся многочисленные исследования по выносу речного материала в море.

2 Цель, задачи, материалы

Цель работы - разработать алгоритм, применив который, оценить динамические процессы связанные с речным плюмом реки Бельбек в прибрежной, мелководной акватории Чёрного моря

Задачи работы: 1. Получить, с помощью бортовой FLIR и оптической камеры БПЛА, фотом и видеоматериал; 2. Разработать алгоритм обработки полученных данных; 3. С помощью алгоритма оценить динамические характеристики потока речного плюма



Рис. 1 Пример БПЛА DJI Mavic 2 Ent. Dual

Материалы - В работе использовался фото-видео материал в FLIR и оптическом диапазоне спектра, полученный с помощью БПЛА типа DJI Mavic 2 Ent. Dual. Для обработки данных съемки, разработки алгоритма и вычисления сопутствующих характеристик, необходимых для решения поставленных задач, использовался пакет прикладных программ Matlab 2014a.

3 Методы исследования

Метод получения видео материала

Бортовые камеры БПЛА позволяют вести параллельную съемку в FLIR диапазоне с разрешением 640x360(480), 4 кадра/сек, горизонтальным углом обзора в 57°, диапазоном t° от -15 до +400 °С, с точностью ±5%, и оптическом диапазоне в разрешение 4k при 24 кадрах/сек. Настраиваемая палитра FLIR камеры позволяет выделять необходимые интервалы температур. Для анализа был выставлен интервал от +15 до +32 °С, пример выставления интервала показан на рисунке 2.

Было выполнено 2 съемки в надир, на высоте 95 и 300 метров над уровнем моря. Бортовая камера записывала видео материал 4 минуты в обоих случаях, в формате mp4. С целью минимизации атмосферного шума, 4 последовательных кадра FLIR камеры усреднялись.

Рис. 2 Плюм в оптическом и FLIR спектре, съемка с высоты 300 м.

Переход от скоростей в пикселях к скоростям в метрической системе координат осуществлялся путем решения уравнения:

$$\mu_x = \frac{x}{r_x} = \frac{2h \tan\left(\frac{\alpha_x}{2}\right)}{r_x}$$

Где, μ_x - мм/pix * h, x - расстояние на местности, r_x - разрешение камеры (360x640), h - высота полета, α_x - угол обзора камеры (57 °)

Обработка аэровидеосъемки

Для восстановления скоростей речного потока использовался метод **взаимной корреляции**. Последовательно расположенные кадры разбивались на области 3x4 пикселей. Визуализация процесса показана на рисунке 3 Из каждой области вычислялось её собственное среднее. Далее, по формуле, в которой X - матрица области первого кадра, H - матрица области второго кадра, черта над H означает комплексное сопряжение:

$$C(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X(m, n) \overline{H(m-k, n-l)}, \quad \begin{matrix} -(P-1) \leq k \leq M-1, \\ -(Q-1) \leq l \leq N-1, \end{matrix}$$

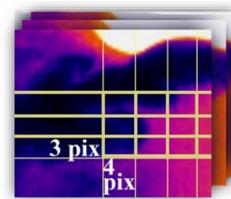
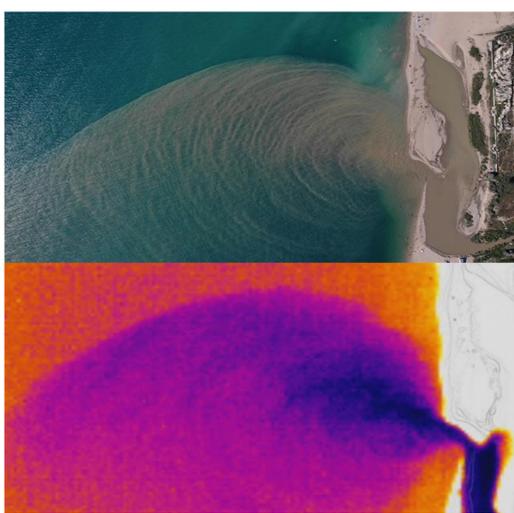


Рис. 3 Принцип обработки кадров видео съемки

Выходная матрица C(k, l) имеет отрицательные и положительные индексы строк и столбцов, которые указывают на направление сдвига. Наибольшее значение в матрице указывает на скорость сдвига.

Алгоритм применялся для всех пар кадров, а так же при областях размером 6x8 и 9x16.



4 Результаты

Результаты расчетов получены следующие поля скоростей, изображенные на рисунке 4. На разных масштабах выбранных областей скорости отличаются.

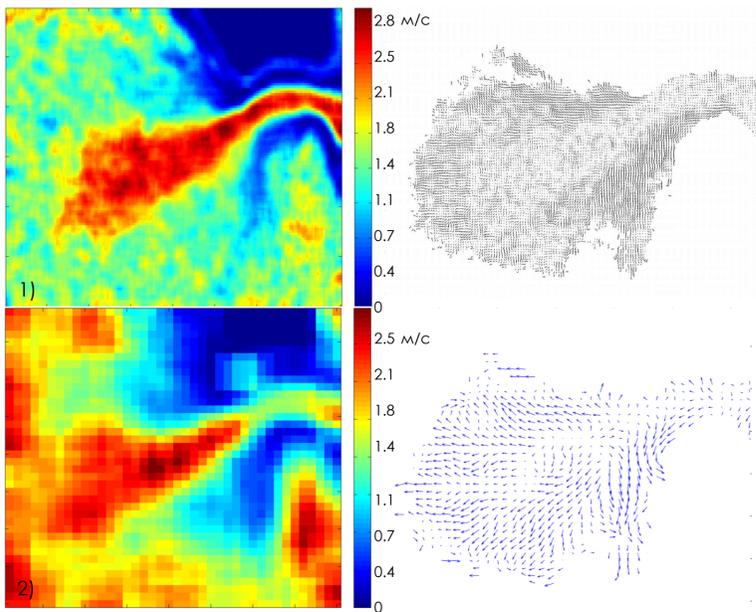


Рис. 4 Восстановленная скорость. Сверху-вниз: 1) скорость с размером области 3x4; 2) с размером 9x16. Цветом показаны значения скоростей в метрах, справа стрелками показано направление.

Поля изображенные на рисунке 4, усреднены по длительности видео. В результате перехода в метрическую систему координат, получилось что 1 пиксель FLIR кадра видео равен ~3,6 метрам на местности.

Наибольшая скорость в потоке при разрешении области 3x4 составила 0,8 pix/c, или ~2,88 м/с. На рисунке 4 видно, что при разных размерах выбранных областей, скорости так же изменяются. Это связано с изменчивостью регистрируемых данных, при уменьшении масштаба области, из расчетов алгоритма пропадают мелкомасштабные динамические процессы. Однако при увеличении масштаба, читается скорость потока в целом.

Пик скорости зарегистрированный у устья реки, является результатом большого количества обрушений волн, связанным с геоморфологией прибрежной акватории. Пример обрушений показан на рисунке 6.

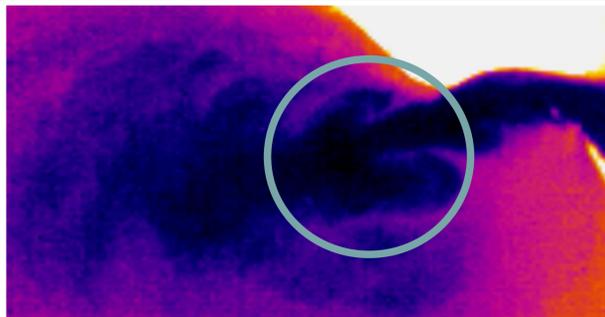


Рис. 5 Грибовидные структуры в потоке плюма реки Бельбек



Рис. 6 Зона обрушения поверхностной волны у устья реки

В ходе анализа потока плюма реки, на видеоматериале были выделены **грибовидные структуры**, образующиеся в 10 метрах от сопла устья реки. Образование вихревых диполей (Иванов К.Д., Травкин В.С., 2020), в отмеченном на рисунке 5 районе, может быть связано с преобразованием ламинарного течения потока реки в турбулентное, вследствие ряда неустойчивостей, в том числе вызванных встречным по направлению ветровым течением.



Рис. 7 Подповерхностные волны (стрелки), образованной грибовидной структурой и место их образование (круг)

После образования, часть вихревых диполей преобразуется во вторичные, при этом продолжая перемещение по направлению потока, в виде вихревых структур. Волна образованная этим процессом четко отслеживается уже на оптической съемке с высоты 300м. Пример такой волны показан на рисунке 7. Волны образованные соседними диполями, с расстоянием нагоняю друг друга, уменьшая период, и продолжают движение в направлении потока.

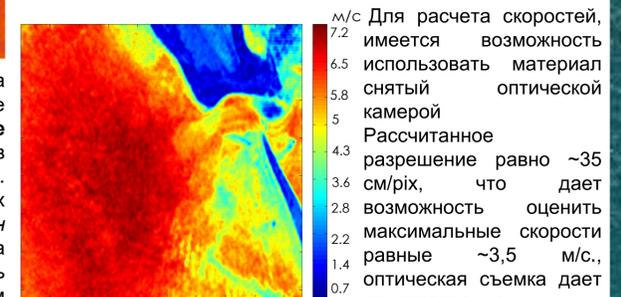


Рис. 8 Скорости в оптической съемке, с областями 3x4

Для расчета скоростей, имеется возможность использовать материал снятый оптической камерой. Рассчитанное разрешение равно ~35 см/pix, что дает возможность оценить максимальные скорости равные ~3,5 м/с., оптическая съемка дает представление о поверхностном волнении.

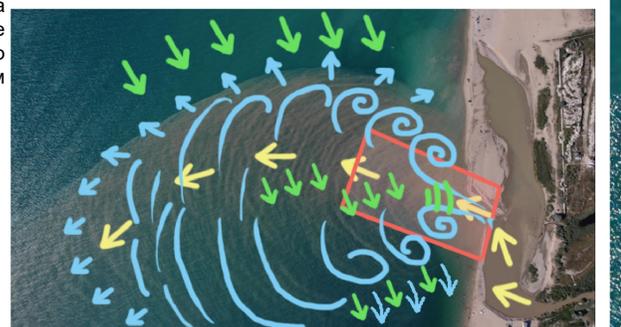


Рис. 9 Схема наблюдаемых процессов. На схеме (Рисунок 9) выделены некоторые динамические процессы, связанные с интенсифицированным потоком речного плюма. Синим цветом показаны место образования грибовидных структур, их эволюция и направление, зеленым, встречное, запирающее ветровое течение и место обрушение ветровой волны, желтым основное направление потока, красным выделена зона съемки FLIR камеры (95 м).

5 Выводы

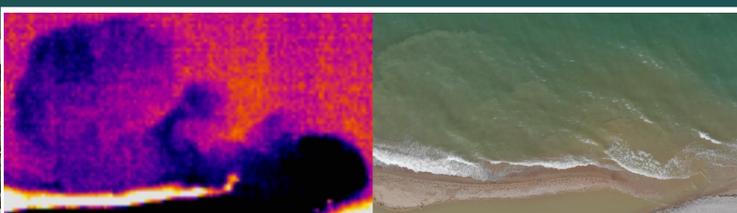


Рис. 10 Съемка плюма реки Бельбек в FLIR и оптике через несколько дней после обильных осадков

В работе на основе видеосъемки в оптическом канале были рассчитаны динамические характеристики образуемой потоком волны и исследовано их влияния на оптические свойства водной массы. Использование преобразования Радона и взаимной корреляции дало возможность рассчитать скорость образуемой волны и её длину. Одной из ярких особенностей динамики потока является наличие подповерхностной, вследствие разницы температур, волны, распространяющейся от устья реки. Обнаруженные грибовидные структуры, или вихревые диполи, являются важным механизмом горизонтального обмена массой и импульсом. Разработка методов наблюдения с помощью БПЛА может открыть возможность для уточнения физических процессов как в прибрежной акватории, так и в открытом море, стать основой для дальнейших исследований. Предложенный подход, наряду с возможностью покрытия достаточно больших площадей, способен обеспечить высокую репрезентативность информации вместе с возможностью выполнения поставленных исследовательских задач в кратчайшие сроки.

Контакты для связи с авторами: alsha996@yandex.ru Новиков Борис Александрович