# МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАКЛОНОВ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОЛЕТЕ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

В. Караев, М.Каневский, Е.Мешков

Институт прикладной физики РАН 603950, Нижний Новгород, Ульянова, 46 тел.: (831)4164928, e-mail: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru



Рис. 1. Схема наблюдения.







Рис. 3. Ножевая антенна установлена внутри обтекателя



Рис. 4. Траектория движения вертолета во время эксперимента.

### 2. Общий алгоритм

Ширина доплеровского спектра вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2 \cdot \ln 10}}{\lambda} \cdot \left[ \sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2} + \right]$$

$$+\frac{K_{xt}^2\delta_y^2}{\sigma_{xx}^2(5,52\sigma_{xx}^2+\delta_y^2)}+\frac{\delta_x^2\sigma_{yy}^2}{\left(5,52\sigma_{yy}^2+\delta_x^2\right)}\cdot\left(\frac{K_{yt}}{\sigma_{yy}^2}-V\right)^2\right]^{0,5}$$

где  $\lambda$  – длина волны радиолокатора. Диаграмма направленности антенны предполагается гауссовой, где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – ширина диаграммы направленности на уровне 0,5 по мощности вдоль осей *X* и *Y* соответственно.

Для описания взволнованной водной поверхности используются ключевые статистические характеристики, вычисленные для крупномасштабного, по сравнению с длиной волны падающего излучения, волнения. Это дисперсии наклонов вдоль осей  $X(\sigma_{xx}^2)$  и  $Y(\sigma_{yy}^2)$ , дисперсия орбитальных скоростей  $\sigma_{tt}^2$  и коэффициенты корреляции наклонов вдоль осей X и Y и вертикальной составляющей орбитальной скорости  $K_{xt}(\tau)$  и  $K_{yt}(\tau)$  в точке  $\tau = 0$  (далее коэффициент корреляции).

## 2. Полный алгоритм

В формуле для ширины доплеровского спектра пять неизвестных и для их нахождения необходимо иметь систему уравнений. Для увеличения числа исходных уравнений в качестве параметра использовался азимутальный угол. При прямолинейном движении в качестве параметра выберем изменение скорости полета.

Предположим, что на рассматриваемом участке изменение скорости движения происходило два раза, т.е. в нашем распоряжении есть три значения ширины доплеровского спектра:  $\Delta f_{10a}$ ,  $\Delta f_{10b}$  и  $\Delta f_{10c}$ . Будем считать, что  $V_a < V_b < V_c$ , тогда коэффициент корреляции вычисляется по следующей формуле:

$$K_{yt} = \frac{5,52 \cdot \sigma_{yy}^2 + \delta_x^2}{4\delta_x^2 \cdot (V_b - V_a)} \cdot \left[ \frac{\lambda^2 (\Delta f_{10a}^2 - \Delta f_{10b}^2)}{16 \cdot \ln 10} + \frac{2\delta_x^2 \sigma_{yy}^2 (V_b^2 - V_a^2)}{5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2} \right]^{0,2}$$

а дисперсия наклонов поверхности вдоль направления движения:

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{A_0 \cdot \delta_x^2}{32\delta_x^2 \ln 10 \cdot (V_c - V_a)(V_b - V_a)(V_b - V_c) - 5,52 \cdot A_0}$$

где

$$A_0 = \lambda^2 \cdot \left( \Delta f_{10a}^2 (V_b - V_c) + \Delta f_{10b}^2 (V_c - V_a) - \Delta f_{10c}^2 (V_b - V_a) \right) \,.$$

## 3. Линейные алгоритмы

Первый линейный алгоритм можно получить, если исходной формуле для доплеровского спектра пренебречь членом, связанным с фазовой скоростью движения волн по сравнению со скоростью движения носителя. Тогда получим следующее выражение для дисперсии наклонов:

$$\sigma_{yy}^{2} = \frac{\delta_{x}^{2}\lambda^{2}(\Delta f_{10b}^{2} - \Delta f_{10a}^{2})}{32\delta_{x}^{2}\ln 10 \cdot (V_{b}^{2} - V_{a}^{2}) - 5,52\lambda^{2}(\Delta f_{10b}^{2} - \Delta f_{10a}^{2})}$$

В этом случае для определения дисперсии наклонов требуется одно изменение скорости, т.е. всего два уравнения. При полете перпендикулярно волнению алгоритм является точным.

Если радиолокатор расположен, например, на спутнике, то движением поверхности можно пренебречь и тогда дисперсия наклонов вдоль траектории движения восстановится по следующей формуле.

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_x^2 \lambda^2 \Delta f_{10a}^2}{32\delta_x^2 \ln 10 \cdot V_a^2 - 5{,}52\lambda^2 \Delta f_{10a}^2}$$

Для работы второго линейного алгоритма не требуется изменения скорости полета, но за это приходится расплачиваться точностью восстановления при невысокой скорости движения.

### 3. Линейные алгоритмы



**Рис. 5.** Зависимость «восстановленной» дисперсии наклонов от скорости движения носителя. Сплошная кривая - первый линейный алгоритм, пунктир - второй линейный алгоритм. Горизонтальная прямая – истинное значение дисперсии наклонов (скорость ветра 5 м/с).

На точность алгоритмов влияет погрешность определения входных параметров. Выполним оценку чувствительности алгоритмов к неточности задания входных параметров (скорость и ширина ДС).

Таблица 1. Результаты работы полного алгоритма в зависимости от величины ошибки определения скорости  $V_a$  при неточном задании  $V_b = 44,4$  м/с (44 м/с) и $V_c = 48,8$  м/с (48 м/с) и  $V_b = 220,4$  м/с (220 м/с) и  $V_c = 240,8$  м/с (240 м/с).

		yy	yı				
V <sub>a</sub> , м/с	38,4	39,2	39,6	40	40,4	40,8	42,6
$\sigma_{yy}^2$	0,1485	0,0416	0,0214	0,0087	0,0000	-0,0060	-0,0136
$K_{yt}, M/c$	4,6061	1,0748	0,4088	-0,0136	-0,2984	-0,4984	-0,7496
V <sub>a</sub> , м/с	198,4	199,2	199,6	200	200,4	200,8	201,8
$\sigma_{yy}^2$	0,0274	0,0179	0,0141	0,0108	0,0078	0,0053	0,0009
$K_{yt}, M/c$	2,5453	1,0790	0,4929	-0,0188	-0,3733	-0,8675	-1,5399

Истинные значения:  $\sigma_{yy}^2 = 0,0114$  и  $K_{yt} = 0,0252$  м/с (модель).

Линейный алгоритм восстанавливает только дисперсию наклонов, что делает невозможным определение истинной скорости движения.

Таблица 2. Результаты работы линейного алгоритма в зависимости от величины ошибки определения скорости  $V_a$  ( $V_b$  = 44,4 м/с и 220,4 м/с).

V <sub>a</sub> , м/с	38,4	39,2	39,6	40	40,4	40,8	42,6
$\sigma_{yy}^2$	0,0064	0,0075	0,0082	0,0091	0,0103	0,0119	0,0175
V <sub>a</sub> , м/с	198,4	199,2	199,6	200	200,4	200,8	201,8
$\sigma_{yy}^2$	0,0099	0,0104	0,0106	0,0109	0,0112	0,0115	0,0122



скорость движения, м/с

**Рис. 6.** Зависимость «восстановленной» дисперсии наклонов (кривая 1) и коэффициента корреляции (кривая 2) от скорости движения носителя по полному алгоритму. Прямая 3 соответствует истинному значению дисперсии наклонов, 4 – нулевой уровень. Смена знака происходит при скорости 39,98 м/с.

В общем случае необходимо проводить коррекцию всех трех скоростей и поиск вести в трехмерном пространстве.

Было разработано программное обеспечение и заданы следующие интервалы изменения скоростей:

 $V_a = 39,5 \text{ M/c} \div 40,5 \text{ M/c}$ 

- $V_{h} = 43,5 \text{ M/c} \div 44,5 \text{ M/c}$
- $V_c = 47,5 \text{ M/c} \div 48,5 \text{ M/c}.$

В результате обработки дисперсия наклонов, вычисленная по полному алгоритму, равна **0,0113**, по первому линейному – **0,0110**. Таким образом, даже при малых скоростях движения предложенные алгоритмы продемонстрировали хорошую точность в условиях «неопределенности» по скорости движения. Истинное значение дисперсии **0,0114**.

## 5. Устойчивость алгоритмов. Ширина ДС.



**Рис. 7.** Зависимость «восстановленной» дисперсии наклонов (кривая 1) и коэффициента корреляции (кривая 2) от ширины доплеровского спектра, вычисленных по полному алгоритму. Прямая 3 соответствует истинному значению, 4 – нулевой уровень.

5. Устойчивость алгоритмов. Ширина ДС.

В этом случае тоже можно использовать смену знака у коэффициента корреляции в качестве индикатора правильного значения.

Было проведена вариация по ширине доплеровского спектра и параметры менялись в следующих интервалах:

$$\begin{split} \Delta f_{10a} &= 0.98 \,\Delta f_{10a} \div 1.02 \,\Delta f_{10a}; \\ \Delta f_{10b} &= 0.98 \,\Delta f_{10b} \div 1.02 \,\Delta f_{10b}; \\ \Delta f_{10c} &= 0.98 \,\Delta f_{10c} \div 1.02 \,\Delta f_{10c}. \end{split}$$

В результате обработки дисперсия наклонов, вычисленная по полному алгоритму равна **0,0118**, по первому линейному – **0,0106**. Истинное значение **0,0114**.

Таким образом, разработанные алгоритмы продемонстрировали хорошую точность в условиях «неопределенности» по ширине доплеровского спектра.



Рис.8. Вертолет МИ-8 с установленной антенной системой.



Рис. 9. Траектория движения вертолета во время эксперимента.

N⁰	Временной интервал	Высота поле-	Скорость движе-	Ширина ДС, Гц,
	усреднения	та, м	ния, м/с	$\Delta f_{10}$
44	12:39:01 - 12:39:20	177,2	31,5	554
82	12:46:17 - 12:46:37	153,4	28,8	556
45	12:39:40 - 12:40:00	178,1	30,3	530
62	12:41:46 12:42:01	159,8	28,6	609

Таблица 3. Параметры точек

Дисперсия наклонов  $\sigma_{xx}^2$  - азимутальные алгоритмы (по сечению обратного рассеяния и доплеровскому спектру): среднее - **0,0062** (0,006; 0,0064) Полный алгоритм/первый линейный: **0,00615** 

Второй линейный: 0,0052

Дисперсия наклонов  $\sigma_{yy}^2$  - азимутальные алгоритмы (по сечению обратного рассеяния и доплеровскому спектру): среднее - **0,0075** (0,0074; 0,0076) Второй линейный: **0,0067** и **0,0091** (среднее 0,0079)



Рис. 10. Восстановление дисперсии наклонов вторым линейным алгоритмом (44-45 точки).

6. Выводы.

1. Разработаны алгоритмы восстановления дисперсии наклонов и коэффициента корреляции по ширине доплеровского спектра при прямолинейном движении (полный и два линейных).

2. Проведена оценка чувствительности алгоритмов к погрешности входных параметров и предложена процедуры вариации по скорости полета и ширине доплеровского спектра, позволяющие уменьшить ошибку восстановления дисперсии наклонов.

3. При увеличении скорости полета точность восстановления дисперсии наклонов увеличивается и при измерении со спутника восстановление возможно при постоянной скорости движения.

4. Алгоритмы устойчивы к изменению мощности сигнала, высоты полета.

5. Первые результаты обработки экспериментальных данных подтверждают работоспособность алгоритмов.