

Модель обработки радиолокационной метеорологической информации с использованием двумерного преобразования Фурье

Н. П. Стадная, e-mail: st.hope11@gmail.com
С. А. Переселков, e-mail: pereselkov@yandex.ru
С. Л. Кирносов, e-mail: slk_met@mail.ru
Д. Б. Долгих, e-mail: deendolgij@yandex.ru
А. В. Самсонов, e-mail: Sinoptik78@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия» (г. Воронеж)

***Аннотация.** В работе построена модель обработки и анализа радиолокационной метеорологической информации с использованием двумерного преобразования Фурье.*

***Ключевые слова:** Интерференция, интерферограмма, голограмма, двумерное преобразование Фурье, радиолокационная информация.*

Введение

В настоящее время опасные явления погоды продолжают оказывать негативное влияние на эффективность и безопасность полетов авиации. Большую опасность для полета воздушных судов представляют такие явления погоды как град, гроза, ливневый дождь, обледенение и т.д. Эти явления, обусловленные мезо- и микромасштабными возмущениями в атмосфере, имеют небольшие размеры и время существования от нескольких часов до нескольких минут. Поэтому существующей сетью наземных наблюдений обнаруживаются либо случайно, либо вообще не обнаруживаются. Для решения задачи обеспечения безопасности полетов хорошо зарекомендовали себя радиолокационные методы получения метеоинформации об опасных явлениях. [1]

На данный момент разработано множество моделей получения метеоинформации с помощью радиолокационных систем наблюдения, которые отличаются процедурами распознавания, используемым пространством признаков распознавания, способом обработки и представления исходных данных и т.д. Несмотря на это, достигнуто некоторое насыщение в точности идентификации явлений погоды радиолокационными методами.

© Стадная Н.П., Переселков С.А., Кирносов С.Л., Долгих Д.Б., Самсонов А.В., 2023

Важным индикатором процессов, протекающих в атмосфере, является форма образовавшейся облачности и ее микрофизические характеристики.

Используя априорно информацию о физическом состоянии атмосферы можно упорядочить микрофизические процессы (а значит и значения радиолокационной отражаемости), сопровождающие то или иное опасное явление погоды. Поскольку между микрофизическими параметрами облаков и осадков и их радиолокационными характеристиками существует статистическая связь, то такой подход позволит использовать новый информационный резерв в процедуре идентификации опасных явлений погоды по радиолокационным данным, т.е. сделать ее адаптивной к физическому состоянию атмосферы. [2]

Целью работы является повышение эффективности метеорологического обеспечения на основе построения модели с использованием математического аппарата получения голограмм с применением двумерного преобразования Фурье при обработке радиолокационных данных.

В работе строится модель обработки и анализа метеорологической информации по данным радиолокационного зондирования атмосферы.

1. Получение интерференционной картины и построение голограммы Фурье

За основу берется движущийся источник излучения (в метеорологии в качестве такого могут выступать, например, грозовые облака). Данный источник при взаимодействии с любой падающей электромагнитной волной будет искажать падающий сигнал, частично отражая его. В этом случае используется электромагнитное излучение от радиолокационной станции (излучатель) стационарной или на движущемся летательном аппарате, отправляющий сигнал и одновременно с этим принимающий отраженный от метеорологического объекта.

Падающая и отраженная волны интерферируют, что позволяет рассматривать интерференционную структуру поля, представленную на рис. 1.

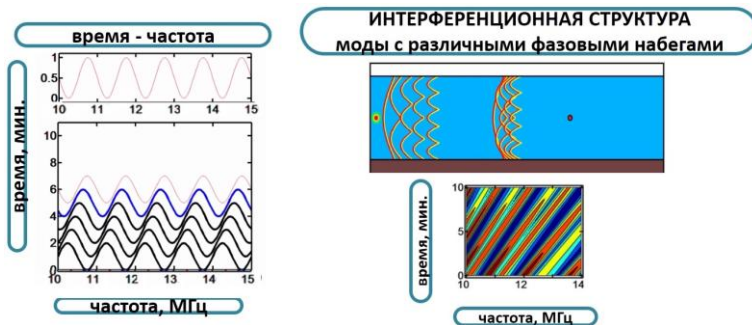


Рис. 1. Интерференционная структура электромагнитного поля в воздушном волноводе

Данные об интерференции собираются в течение некоторого времени, и, с учетом того, что источник излучения (облако) движется, происходит фазовое смещение мод излучения, что можно заметить на так называемой интерферограмме (справа), где данное смещение проявляется в виде наклонных полос.

Для отслеживания временной зависимости параметров источника в течение длительного времени T следует использовать каскадное накопление спектральной плотности волнового поля.

Данные для обработки представляют собой массив значений – характеристик электромагнитного поля – амплитуды напряженности $p(r, t)$. Далее, для расчетов используется интенсивность – квадрат модуля напряженности.

Преобразование Фурье по временной компоненте дает спектральную функцию $I(r, f)$. Учитывая тот факт, что отсчеты при записи с приемника проводятся во времени, а расстояние между приемником и источником, вообще говоря, неизвестно, фактически работа происходит с массивом значений в частотно-временном диапазоне, то есть с функцией $I(f, t)$. Полученная функция $I(f, t)$ отображается в виде интерферограммы – графическом отображении интерференционной картины, возникающей в результате наложения когерентных волн. [3]

При построении интерферограммы реального сигнала всегда можно выделить полосу частот, которая вносит максимальный энергетический вклад в принимаемый сигнал, середина этого участка f_0 – средняя частота принимаемого спектра источника; а также

временной интервал Δt с момента наблюдения t_0 для обработки и анализа именно этой полосы частот. (1)

$$-\frac{\Delta f}{2} + f_0 \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta f}{2}, t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t. \quad (1)$$

Далее функция $I(f, t)$ подвергается двумерному преобразованию Фурье в указанном участке, при этом получается функция $F(\tau, \nu)$, называемая фурье-голограммой. Здесь ν и τ – частота и время голограммы. (2)

$$F(\nu, \tau) = \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I(f, t) \exp[2\pi i(\nu t - ft)] dt df. \quad (2)$$

Примечательно, что квадрат модуля данной функции – спектральная плотность – локализуется в небольших областях в виде фокальных пятен.

По измеренным координатам τ и ν фокальных пятен оцениваются начальное расстояние r_0 и относительная радиальная скорость (скорость сближения или отдаления). При этом для расчетов используются известные волновые числа мод волны $h(f)$. (3)

$$h(f_0) = \frac{2\pi f_0}{c}, \tau = r_0 \frac{dh(f_0)}{df}, \nu = -\nu_r h(f_0). \quad (3)$$

Используя информацию о локализации голограммы спектральной плотности определяется, удаляется ли источник от приемника или приближается к приемнику. Область локализации содержит фокальные пятна, отвечающие различным интерферирующим модам. По числу пиков делается вывод о количестве мод в сигнале. Наклон линии, соединяющей пятна, совпадает с наклоном полос на интерферограмме. Таким образом, в целом, для формирования голограммы необходимо построить интерферограмму, затем провести двумерное преобразование Фурье и получить голограмму (рис. 2). [4]

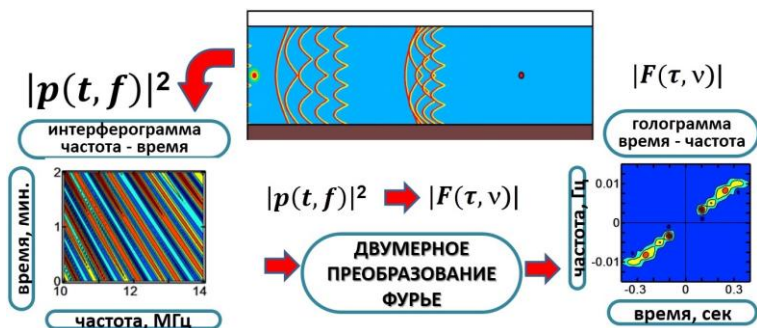


Рис. 2. Формирование голограммы

Первично полученная голограмма нуждается в специальной обработке за счет так называемой согласованной обработки («вырезания» центрального пятна). Это приводит к более резкому вычерчиванию фокальных пятен, что облегчает анализ. В качестве условия непосредственного обнаружения сигнала при наличии помехи используется критерий, согласно которому пик функции обнаружения P на прямой $\nu = \varepsilon\tau$ расположения максимумов фокальных пятен при входном отношении сигнал/помеха в два и более число раз превышает помеховые пики G_n . Здесь τ_{\max} – линейный размер области локализации по оси времени τ ; ε_* – варьируемое значение углового коэффициента (рис. 3).

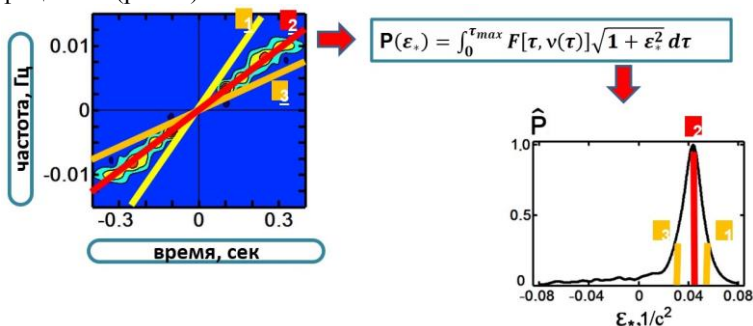


Рис. 3. Голограмма обнаружения источника сигнала.

На рис. 4 представлена визуализация движения источника и соответствующих голограмм. Голограмма неподвижного источника, затем ускоряющегося, замедляющегося, остановившегося и

движущегося в противоположном направлении. Видно, как меняется расположение фокальных пятен.

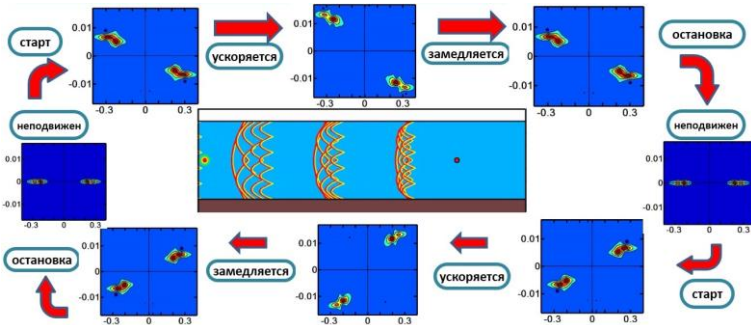


Рис. 4. Голограмма изменчивости скорости движения источника сигнала.

Для определения пеленга используется не радиальная скорость, а компоненты скоростей на оси x и y . Для их определения строятся отдельные интерферограммы и голограммы по компонентам скоростей исходя из данных, полученных из различных каналов: v_x и v_y соответственно. [5]

Пеленг определяется по отношению максимумов функций обнаружения P (рис. 5).

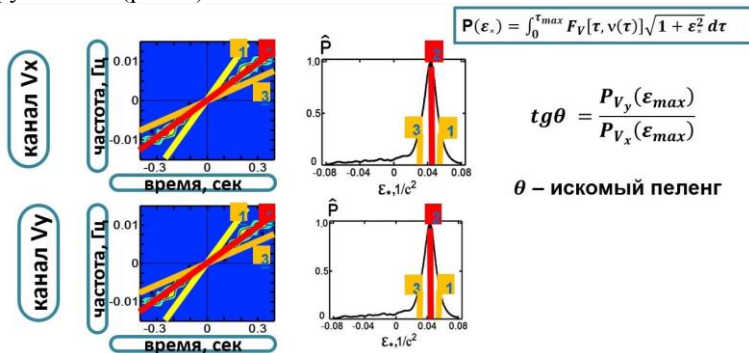


Рис. 5. Голограмма и определение пеленга.

Данный метод так же дает возможность обнаружения на голограмме нескольких источников. На рис. 6 представлены

разделенные голограммы и отдельные интерферограммы от нескольких источников.

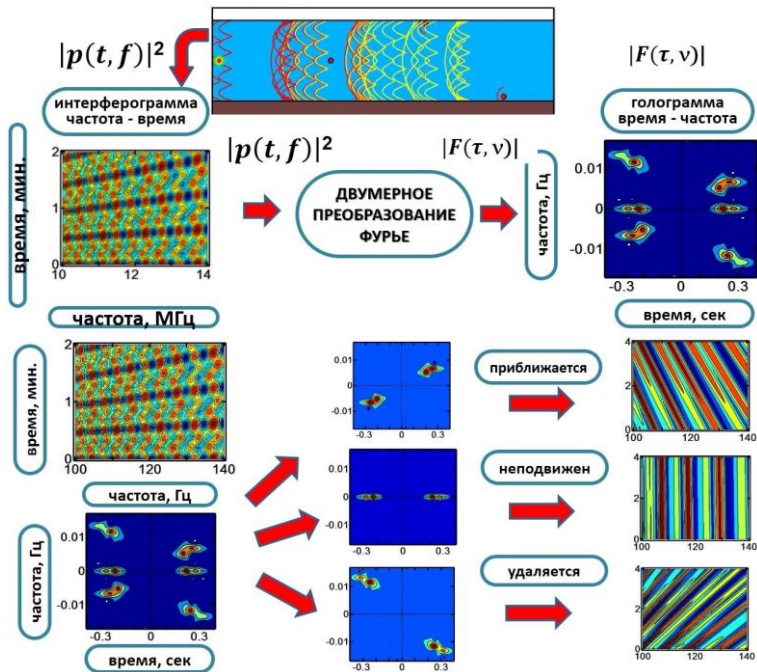


Рис. 6. Голограммы и интерферограммы нескольких источников с разложением на отдельные сигналы.

Закключение

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что описанная выше модель применима к использованию в обработке и анализе радиолокационных данных для определения опасных явлений погоды.

Ожидается, что применение данной модели улучшит качество радиолокационных данных и снизит уровень шумов на экранах (как пример: от местных засветок), а также повысит точность координат и внешних границ зон с опасными явлениями.

Литература

1. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.

2. Лебедев Г.Н., Михайлов В.В., Кузнецов И.Е., Матвеев М.Г. Оптимальное управление качеством радиометеорологических измерений // Научно-теоретический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2011.– № 5. – С. 35 – 39.

3. Pereselkov S., Kuz'kin V. Interferometric processing of hydroacoustic signals for the purpose of source localization // J. Acoust. Soc. Am. 2022. Vol. 151. N 2. P. 666–676.

4. Интерферометрическая обработка гидроакустических сигналов: учебное пособие / С. А. Переселков, В. М. Кузькин; Воронежский государственный университет. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2022. – 90 с.

5. Кузькин В.М., Переселков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. Метод определения местоположения малошумного источника звука // Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2018. № 2. С. 53-63.