

**ВЕТРОВОЙ АВТОМАТ. I. ПРОБЛЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ**

Радионаблюдения метеоров являются единственным эффективным методом, позволяющим проводить систематические исследования атмосферных течений на высоте около 80—100 км в различных пунктах земного шара. Совершенствование радиометода и улучшение результатов наблюдений связаны наряду с развитием современной теории атмосферных течений с решением ряда проблем методического и аппаратурного характера, в первую очередь с построением общей теории интерпретации радионаблюдений дрейфа метеорных следов, в том числе для мультипликативных моделей интерпретации [5].

В работах [1, 2] изложены основные положения оптимальной обработки радиометеорной информации применительно к работе ветровых метеорных РЛС. Подчеркивается, что в большинстве практически важных случаев машинные алгоритмы являются более эффективными, чем традиционно используемые алгоритмы визуальной обработки.

Реализация эффективных алгоритмов интерпретации, особенно в связи с изучением локальной и глобальной циркуляции, связана с необходимостью значительного повышения информативности первичного наблюдательного материала.

Известно, что в результате перемещения метеорного следа под действием ветра изменяются параметры рассеянных им сигналов. Наибольшим изменениям подвержена фаза радиосигналов. Изменения фазы во времени  $\varphi(t)$  имеют довольно сложный характер и определяются не только радиальной составляющей скорости дрейфа, но и изменениями вследствие диффузии, дифракции и ряда других причин. Исследования поведения  $\varphi(t)$  с целью получения оптимальных оценок радиальной составляющей

шей дрейфа — необходимая часть оптимального алгоритма интерпретации.

Теоретическому и экспериментальному исследованию поведения  $\varphi(t)$  посвящено большое количество работ. Несмотря на это, задача определения наиболее информативной совокупности оценок (базис пространства оценок) не решена, что объясняется в первую очередь многофакторностью процессов формирования, разрушения и движения метеорного следа. С этой точки зрения наиболее перспективными нам представляются попытки решения прямой задачи — моделирование процессов в следе с исследованием влияния первичных факторов на параметры  $\varphi(t)$  [3]. Не ставя перед собой задачи анализа упомянутых проблем, остановимся лишь на некоторых моментах, имеющих непосредственное отношение к последующему изложению.

Рассмотрим упрощенную теоретическую модель  $\varphi(t)$ . Воспользуемся формулой (2.11) работы [4] и сделаем следующее предположение:

$$R = R_0 + \frac{1}{2} \frac{s^2}{R_0} + \frac{s_0 - s}{v} u,$$

где

- $R$  — расстояние от РЛС до отраженного элемента следа;
- $R_0$  — расстояние от РЛС до точки зеркального отражения;
- $s$  — отсчитывается от точки зеркального отражения на следе в направлении движения метеора;
- $s_0$  — положение «головы» метеора;
- $v$  — скорость движения метеорного тела;
- $u$  — радиальная составляющая скорости ветра.

При этом предполагается  $s \ll R$ .

Полагаем, что радиальная компонента ветра линейно зависит от  $s$  в пределах части ионизированного следа, создающего отраженную волну. Это предположение является необходимым, иначе невозможно было бы выделить существенную информацию из принятого эхо. В частности, мы не можем определить вариации ветра внутри первой зоны Френеля, имеющей размер около 1 км. Заметим, что эта величина является минимальным пространственным масштабом при построении моделей и алгоритмов вторичной обработки. Радиальную составляющую скорости запишем в виде

$$u = u_0 + as,$$

где  $a$  — ветровой сдвиг вдоль следа,  $m \cdot сек^{-1} км^{-1}$ .

При сделанных предположениях напряжение на входе приемника, создаваемое сигналом, рассеянным на линейном полубесконечном следе:

$$E_r = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \delta}} e^{i \frac{\pi}{2} \Phi(v, \delta)} \int_{-\infty}^{x_0^*} e^{i \frac{\pi}{2} x_0^{*2}} dx^*, \quad (1)$$

где

$$\Phi(\nu, \delta) = \frac{8\nu}{\lambda} \left[ \frac{2\sqrt{1-\delta}}{2-\delta} x_0^* + \frac{8\nu}{\lambda} (2-\delta) \right] - \left[ \frac{\delta}{2-\delta} x_0^* + \frac{\delta(2-\delta)}{\sqrt{1-\delta}} \cdot \frac{4\nu}{\lambda} - \frac{4\nu}{\lambda\sqrt{1-\delta}} \right]^2; \quad (2)$$

$$\delta = \frac{2aR}{v}; \quad \nu = \frac{u_0\sqrt{R\lambda}}{2v};$$

$\lambda$  — длина волны излученного радиосигнала. Интеграл в выражении (1) описывает дифракционную характеристику некоторого «эквивалентного» метеора, скорость которого  $v^* = \frac{2-\delta}{2\sqrt{1-\delta}}$  а момент прохождения «зеркальной» точки смещен относительно истинного на величину

$$t = \frac{2Ru_0}{v^2(2-\delta)}.$$

Выражение (1) неразрешимо в явном виде относительно  $\Phi(t)$  и решается численными методами либо моделированием процесса формирования отраженного сигнала [3].

Рассмотрим несколько частных случаев. В отсутствие ветра  $v=0$ ,  $\delta=0$ , поэтому  $x^*=x$ ,  $x_0^*=x_0$  и  $\Phi(\nu, \delta)=0$ , а выражение (1) переходит в формулу (2.14) работы [4].

При отсутствии ветрового сдвига ( $a=0$ ) в установившемся режиме ( $x_0 \gg 1$ ) фаза отраженного сигнала

$$\Phi(\nu) = \frac{4\pi\nu}{\lambda} \left( x_0^* + \frac{16\nu}{\lambda} \right) - \frac{8\pi\nu^2}{\lambda^2}.$$

Опустив постоянную составляющую, имеем

$$\Phi(\nu) = \frac{4\nu}{\lambda} \pi x_0,$$

или

$$\Phi(\nu) = \frac{4\pi u_0 t}{\lambda}.$$

Допплеровское смещение частоты определяется скоростью изменения фазы  $\Phi(\nu)$ , в результате получаем хорошо известную формулу:

$$\Omega_D = \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi \frac{2u_0}{\lambda}.$$

Продифференцировав по времени (2), получим следующее выражение для доплеровской частоты сигнала, отраженного от

перемещающегося и разворачивающегося следа в области  $x_0 \gg 1$ :

$$F_D = \frac{4v\nu}{\lambda\sqrt{R\lambda}} + \frac{2v\delta\nu}{\lambda\sqrt{R\lambda}(1-\delta)} \left[ \frac{2}{2-\delta} - \delta(2-\delta) \right] - \frac{\delta^2 v^2 t}{2(1-\delta)R\lambda}.$$

После подстановок  $v$  и  $\delta$

$$F_D = \frac{2u_0}{\lambda} \left[ 1 + \frac{aR}{v \left(1 - \frac{2aR}{u}\right)} \left( \frac{1}{1 - \frac{aR}{v}} - \frac{2aR}{v} \left(2 - \frac{2aR}{v}\right) \right) \right] - \frac{2a^2 v R t}{\lambda v - 2aR\lambda}.$$

Экспериментальные оценки сдвига скорости ветра вдоль следа в основном удовлетворяют соотношению  $aR \ll v$ . С учетом этого неравенства

$$F_D = \frac{2u_0}{\lambda} \left( 1 + \frac{aR}{v} \right) - \frac{2a^2 R t}{\lambda}, \quad (3)$$

откуда видно, что основной сдвиг оценки радиальной составляющей определяется вторым членом выражения (3), линейно зависящим от  $t$ . Например, при  $a=20$  м·сек<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup>,  $R=150$  км,  $\lambda=8$  м,  $t=1$  сек,  $v=40$  км·сек<sup>-1</sup>.

$$F_D = \left( 2,15 \frac{u_0}{\lambda} - 15 \right) \text{сек}^{-1}.$$

Отмеченные особенности, а также влияние диффузии и дифракции делают отнюдь не тривиальной задачу определения наиболее информативной совокупности оценок  $\varphi(t)$ .

В работе [1] отмечено, что относительно низкая информативность результатов измерений дрейфа определяется в основном неоптимальностью алгоритмов первичной обработки, в первую очередь широко применяемого на практике алгоритма визуальной обработки [2].

Реализация эффективных алгоритмов первичной обработки [2] и использование для этой цели импульсных цифровых фазометров позволяют ставить и решать следующие задачи:

1) определение наиболее информативной части  $\varphi(t) = \varphi_0(t) + \varphi_n(t) + \varphi_a(t)$ , где  $\varphi_0(t)$  — искомая зависимость,  $\varphi_n(t)$  — случайное центрированное расхождение;  $\varphi_a(t)$  — неслучайное неизвестное расхождение модельного и экспериментального поля наблюдений;

2) проверка состоятельности гипотезы о линейности  $\varphi_0(t)$ ;

3) выбор нелинейной модели, например, модели типа (3) в случае несостоятельности упомянутой выше гипотезы;

4) изучение обобщенных параметров  $\varphi_n(t)$  с использованием их для оценки эффективности интерпретации.

Информация, заключенная в амплитудно-временной характеристике  $A(t)$ , дает возможность значительно ослабить влияние  $\varphi_a(t)$  на оценки  $\varphi_0(t)$ . Эта информация необходима также при исследовании сложных моделей  $\varphi_0(t)$ , включающих  $\varphi_a(t)$ , например, при изучении турбулентности, влияния диффузии на эффективность оценок радиальной составляющей дрейфа и др.

Используемые в настоящее время алгоритмы вторичной обработки [6] построены над совокупностью оценок радиальных составляющих  $v_{ri}$ , причем оценки  $v_{ri}$  предполагаются одинаково состоятельными. При этом возможна оптимизация параметров только сравнительно простых моделей интерпретации. Информативные алгоритмы первичной обработки с привлечением информации об  $A(t)$  и угловых координатах отражающей области на следе требуют применения более сложных моделей и соответствующих алгоритмов обработки. Последние, в свою очередь, влияют на вид оптимальных алгоритмов первичной обработки, поскольку разделение обработки (применение разрывных алгоритмов) не может быть формализовано и носит до известной степени искусственный характер [1], хотя статистическая теория и позволяет контролировать ненадежность интерпретации.

В связи с изложенным выше следует сделать ряд уточнений и замечаний по поводу работы [7]. Сигнал на выходе фазового детектора можно считать суммой случайной помехи и детерминированной компоненты только при больших соотношениях сигнал/шум на входе приемника. Использование гармонической функции в качестве модели детерминированной компоненты соответствует требованию линейности  $\varphi(t)$ , которое в общем случае не выполняется.

Метод наименьших квадратов обеспечивает получение оптимальных оценок только в случае, если расхождение экспериментальной и модельной функций в точках измерения является некоррелированным, нормальным с нулевым средним. Гипотеза о нормальности расхождения, в подтверждение которой в работе [7] приведен рис. 2, отвергается по критерию  $\chi^2$  при высоких уровнях значимости. Одной из причин этого является неправильный выбор вида детерминированной компоненты.

Учитывая это, а также сравнительную сложность вычислительной процедуры, вряд ли можно считать целесообразной реализацию этого метода получения оценок  $v_{ri}$  в ветровом автомате.

Определим требования к ветровому автомату как элементу автоматизированной системы сбора и обработки радиометеорологической информации (АССОРМИ) для исследования локальной и глобальной циркуляций, решающему задачи предварительной и первичной обработки и накопления всей информации, которая может быть использована для изучения циркуляции атмосферы.

Ветровой автомат должен решать следующие задачи (программа-минимум):

а) обнаружение, различение и разрешение доплеровских радиосигналов, рассеянных метеорным следом;

б) измерение фазовых сдвигов принятых радиосигналов относительно опорной частоты, оценки  $\varphi(t)$ ;

в) определение информативной части  $\varphi(t)$ ;

г) получение оценок  $A(t)$ , что необходимо для решения предыдущей задачи;

д) вычисление совокупности оценок  $\varphi(t)$ , в том числе оценки математического ожидания производной фазы по времени, стандартного отклонения  $\varphi_i$  и выборочного среднего;

е) определение дальности до метеорного следа;

ж) накопление первичного материала.

Возможная программа-максимум:

а) определение пространственных координат отражающей области на следе;

б) проверка гипотезы о линейности  $\varphi(t)$  с заменой ее в случае несостоятельности нелинейной моделью из заданного класса;

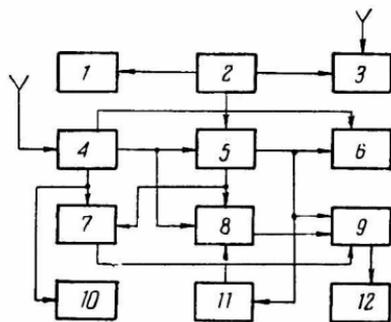
в) вычисление весов, получаемых на  $\varphi(t)$  совокупностей оценок с учетом алгоритмов вторичной обработки информации.

При построении сети метеорных ветровых РЛС накопление на каждом из пунктов должно производиться на носителях, пригодных для непосредственного введения в центральный процессор.

Решение перечисленных задач даже при реализации программы-минимум требует наличия в составе ветрового автомата специализированного вычислительного устройства. Эта задача может быть просто решена использованием в качестве процессора серийной малогабаритной управляющей машины типа УМ1-НХ. Применение ее и выводных устройств типа МП-16, ПЛ-80 (оценки необходимого быстродействия выводных устройств приведены в [2]) практически обеспечивает полную автоматизацию первичной обработки дрейфа.

При проектировании АССОРМИ необходимо также обеспечить решение задач вторичной обработки наблюдательных данных. Решение этой задачи на УМ1-НХ невозможно по двум причинам: во-первых, из-за малого объема оперативной памяти и отсутствия ввода информации с перфоносителей; во-вторых, из-за невозможности организации мультипрограммной работы. В силу этого, по-видимому, целесообразна организация АССОРМИ по кустовому принципу с использованием в качестве центрального процессора более совершенной УВМ. В качестве центрального процессора может быть использована, например, УВМ типа «Днепр-1», имеющая достаточную память и быстродействие и обеспечивающая двухпрограммный режим работы (вторичная обработка в машинном времени и первичная в реальном по прерыванию).

С учетом изложенных выше требований в Харьковском институте радиоэлектроники разработан и испытан ветровой автомат, упрощенная функциональная схема которого приведена на рисунке. Передающее и антенные устройства аналогичны соответствующим устройствам комплекса «Тропик» [8]. Устройство предварительной обработки сигналов (УПО) значительно отличается от вариантов, реализованных в комплексах «Тропик» и «Наташа» [9]. Основные особенности УПО ветрового автомата приведены в [10].



Функциональная схема ветрового автомата:

1 — электронные часы; 2 — синхрогенератор; 3 — передатчик; 4 — приемник; 5 — УПО; 6 — СИД; 7 — ПАК; 8 — ЦИФ; 9 — УВМ; 10 — ФРУ; 11 — имитатор; 12 — выводное устройство.

Автомат включает в себя также имитатор для контроля и настройки УПО, ЦИФ и контрольное фоторегистрирующее устройство (ФРУ), реализованное на базе осциллографа С1-33.

Результаты лабораторных и полевых испытаний комплекса показали полное соответствие реальных характеристик требованиям, сформулированным выше.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимальная обработка радиометеорной информации. I. Постановка задачи. — Сб. «Радиотехника». Вып. 24. Харьков, 1973, с. 17—24. Авт.: Б. Л. Кашеев, Ю. И. Волощук, А. А. Дьяков и др.
2. Нечитайленко В. А. Оптимальная обработка радиометеорной информации. II. Оптимальные машинные алгоритмы первичной обработки радионаблюдений дрейфа метеорных следов. — Сб. «Радиотехника». Вып. 24. Харьков, 1973, с. 35—44.
3. Костылев К. В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань, 1970, с. 56—67.
4. Кашеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., «Наука», 1967, 215 с.
5. Гольцман Ф. М. Статистические модели интерпретации. М., «Наука», 1971. 322 с.
6. Кашеев Б. Л., Нечитайленко В. А. Оптимальные методы измерения скорости ветра радиометеорным способом и обработка радиометеор-

ной информации. Информ. сообщение № 10 ККМ Астросовета АН СССР, М., 1971, с. 1—9.

7. Статистический подход к обработке информации о скорости дрейфа метеорного следа. — Сб. «Радиотехника». Вып. 30. Харьков, 1974, с. 21—26. Авт.: А. А. Бабенко, В. Н. Кузнецов, М. Ф. Лагутин и др.
8. Радиометеорные исследования циркуляции верхней атмосферы. Душанбе, 1973. 200 с. Авт.: П. Б. Бабаджанов, Б. Л. Қашеев, В. А. Нечитайленко и др.
9. Нечитайленко В. А. Система защиты от помех метеорной станции. — «Кометы и метеоры», 1970, № 18, с. 21—26.
10. Нечитайленко В. А. Ветровой автомат. II. Предварительная обработка сигналов. См. статью настоящего сборника.