

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ДОППЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ КРАТКОВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

М. Ф. Лагутин, В. П. Онуфриев, О. А. Деняк, В. Н. Кузнецов, Т. П. Петручек

Харьков

Исследование области атмосферы на высотах 75—110 км, где сгорают метеорные частицы (М-зона), представляет большой теоретический и практический интерес. Метеорные ионизированные следы, создаваемые в ионосфере мельчайшими частицами метеорного вещества, вторгающимися в атмосферу с космической скоростью, являются своего рода естественными зондами, по поведению которых можно судить о свойствах атмосферы на соответствующих высотах, и, в частности, о ветровом режиме атмосферы. Известно, что метеорные методы исследования ветров обладают целым рядом ценных преимуществ перед другими геофизическими способами.

На современном этапе, когда показана возможность использования радиоотражений от метеоров для изучения регулярных и нерегулярных движений в атмосфере и доказана ценность результатов таких наблюдений [1, 2, 3,], большое значение приобретают методические и аппаратурные вопросы, связанные с совершенствованием процесса получения и

обработки информации. Так, в решении международного симпозиума по физике и динамике метеоров (Чехословакия, 1968 г.) как важнейшая проблема отмечена автоматизация обработки радиометеорной информации.

В настоящее время обработку информации о наклонной дальности, радиальной скорости дрейфа метеорных следов и знаке скорости (направлении дрейфа) производят с помощью фоторегистрирующего устройства, что приводит к высокой стоимости обработки, увеличению срока получения и анализа результатов наблюдения, требует большего штата работников и не исключает субъективных ошибок.

Увеличение сети наблюдательных станций для измерения ветра в М-зоне, расположенных в районах с суровыми климатическими условиями, где обработка информации затруднительна, потребовало разработки полностью автоматизированных систем обработки информации, которые позволяют практически мгновенно получить глобальную синоптическую обстановку в метеорной зоне верхней атмосферы.

Наиболее перспективно при решении задач автоматизации применение средств электронной вычислительной техники, в частности цифровых машин. Этот тип специализированных ЭВМ непосредственно связан с самой РЛС и находится, как правило, в непосредственной близости от нее. Назовем такие ЭВМ устройствами первичной обработки.

Данные устройства необходимо рассматривать как оконечное устройство РЛС, производящее последетекторную обработку сигнала в течение времени, равного или меньшего времени «жизни» ионизированного метеорного следа.

В статье рассматривается цифровое устройство для автоматического определения скорости и знака направления скорости дрейфа метеорного следа, которое разработано и эксплуатируется в Харьковском институте радиоэлектроники и является составной частью автоматического устройства «Дрейф-Э», предназначенного для измерения ветрового режима верхней атмосферы.

Метод и техника измерения

Известно, что радиальная скорость перемещенного ветром метеорного следа при когерентно-импульсной радиолокации может быть определена из простого соотношения [2]

$$V_p = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{T_d}, \quad (1)$$

где λ — длина волны РЛС;

T_d — период доплеровского сдвига частоты.

Измерение радиальной составляющей скорости дрейфа, как легко заметить из формулы (1), сводится к измерению периода. В приемном устройстве выделяют частоту Доплера как разность между частотой принимаемого сигнала и частотой когерентного гетеродина. Полученный разнополярный периодический сигнал преобразовывают в сигнал, удобный для выявления переходов функции через нуль, чтобы в дальнейшем сформировать временной интервал, равный измеряемому периоду. Определение длительности временного интервала производится методом дискретного счета.

Если изменить направление перемещения метеорного следа, наблюдается реверс фазы отраженных сигналов. Так, с приближением объекта частота Доплера увеличивается, с удалением — уменьшается. Для выявления знака изменения доплеровской частоты в когерентно-импульсном приемнике имеется два фазовых канала, в которых выходные сигналы сдвинуты относительно друг друга на 90° (например, в первом канале

сигнал опережает сигнал второго канала). При изменении направления дрейфа фаза входящего сигнала изменяется на 180° , а также изменяется характер сдвига между сигналами на выходах фазовых каналов.

Для определения знака скорости сигналы с выходов фазовых детекторов преобразовывают в прямоугольные импульсы, а затем подают их на различитель фазы (знака) прихода импульсов, в роли которого может выступать устройство с двумя состояниями устойчивого равновесия.

Аппаратура

Процесс первичной обработки радиометеорной информации можно разбить на следующие операции.

1. Фильтрация принимаемых ВЧ радиолокационных сигналов, осуществляемая в радиочастотном тракте приемника РЛС.

2. Обнаружение принимаемых радиолокационных сигналов в условиях помех. Эта задача решается в устройствах последетекторной обработки сигналов и состоит в вынесении однозначного решения «сигнал есть», «сигнала нет».

3. Определение параметров дрейфа метеорного следа.

4. Представление физических величин, характеризующих параметры дрейфа в форме, удобной для использования этих данных в дальнейших узлах обработки информации. Обычно эти данные представляются в двоичном или двоично-десятичном коде.

Эти операции реализованы в цифровом устройстве для автоматического определения скорости и направления дрейфа метеорного следа (рис. 1). Основными составными частями устройства являются: 1 — импульсно-когерентный приемник РЛС; 2 — устройство обнаружения метеорного отражения (УМО); 3 — входное устройство измерителя периода; 4 — блок формирования строка, 5 — декадный счетчик; 6 — цифровой регистратор; 7 — генератор счетных импульсов; 8 — блок автоматического управления; 9 — входное устройство определителя знака; 10 — блок определения знака скорости.

При автоматической обработке метеорной информации основной проблемой является нахождение критерия достаточно надежного выделения метеорного эха на фоне помех, причем главное затруднение заключается в том, что, как и большинство помех, метеорные отражения представляют собой кратковременные пакеты импульсов. Требования к помехоустойчивости должны быть повышены, так как каждый прошедший через селектор импульс помехи приводит к ложному срабатыванию импульсных устройств обработки информации и, следовательно, влечет за собой ошибки и сбои в измерении дрейфа.

В предлагаемом устройстве реализован достаточно простой и надежный вариант помехозащиты:

- кодирование импульсов посылок радиолокатора;
- выделение на выходе приемника всех выбросов, амплитуды которых превышают заданный пороговый уровень;
- проверка комбинирования этих выбросов в периодическую последовательность с априорно известным периодом.

Ввиду кратковременности существования ионизированного следа отраженный сигнал имеет вид пакета импульсов. Регистрация наличия

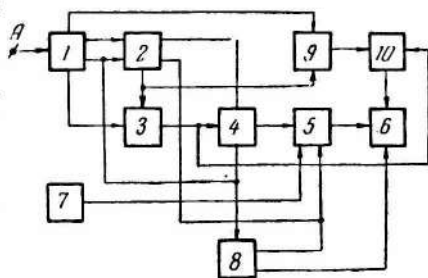


Рис. 1. Блок-схема устройства.

отражения в устройстве обнаружения метеорного отражения 2 сопровождается формированием специального импульса «начало пакета», который через устройство задержки начала обработки информации подается на схему измерения скорости как команда начала измерения.

Для повышения достоверности обнаружения метеорного следа целесообразно принять за начало пакета совокупность нескольких первых импульсов, в противном случае любой случайно возникший сигнал может быть принят за начало радиоэха, что, естественно, приведет к ошибкам.

В связи с этим за начало радиоэха принята серия из трех подряд следующих импульсов с постоянным периодом повторения. На вход устройства обнаружения метеорного отражения поступает аддитивная смесь помехи и отраженных от метеорного следа зондирующих импульсов.

Задача устройства обнаружения — выделить радиоотражение на фоне помех.

При решении этой задачи применяется устройство через двухпериодного сравнения. Оно состоит из двух линий задержки и схемы совпадения на три входа. Время задержки каждой линии соответствует периоду повторения сигналов, отраженных от цели. В нашем случае $T=2$ мсек. Сигнал на выходе схемы И появится только в случае трехкратного временного совпадения импульсов на ее входах. Последующие отраженные импульсы также дадут совпадение, и на выходе получится серия очищенных от помех импульсов, простирающаяся до последнего импульса пакета.

Для выделения импульса «начало пакета» серию очищенных от помех импульсов подают на разрешающий вход схемы «запрета» и на линию задержки, время задержки которой равно периоду повторения полезного сигнала (2 мсек). Задержанный сигнал поступает на запрещающий вход схемы «запрета». На выход схемы «запрета» пройдет только первый импульс «пакета», очищенного от помех, так как спустя период на запрещающий вход схемы «запрета» поступят задержанные на период сигналы, которые запретят прохождение последующих импульсов пакета.

Полученный сигнал «начало пакета» будет задержан по отношению к истинному сигналу «начало пакета» на время, равное 4 мсек (это время неизменно и может учитываться при формировании импульсов управления).

Таким образом, первые три импульса являются критерием формирования импульса «начало пакета».

Выходные устройства 3 и 2 (рис. 1) предназначены для преобразования сигналов с выходов фазовых детекторов приемника 1 к виду, удобному для выявления перехода функции через нуль. С помощью пик-детекторов и фильтров нижних частот выделяется огибающая фазовременной записи доплеровского смещения частоты, которая затем поступает на двухсторонний ограничитель, собранный по схеме многокаскадного УПТ. Усилитель-ограничитель формирует прямоугольные импульсы с короткими фронтами и периодом, равным периоду огибающей и, следовательно, периоду доплеровских биений. С выходов входных устройств 3 и 9 сигналы поступают в блок формирования строба 4 и в блок определения знака 10.

Блок формирования строба 4 предназначен для формирования импульса, управляющего работой счетного устройства. Длительность строба равна или пропорциональна измеряемому периоду доплеровских биений. Следует отметить, что при измерении доплеровских сдвигов частоты необходимо ввести критерий четкого разграничения дрейфовых и дифрак-

клонных изменений фазы. Так, в принятой методике исключается из обработки участок фазовременной записи до первого максимума дифракционной картины [1]. При автоматической обработке, если начало измерения связывать с моментом обнаружения, дифракционные явления могут дать добавочные фазовые сдвиги, превышающие в 40% случаев 20° , что недопустимо [4]. Наиболее простой путь уменьшения дифракционных ошибок — введение задержки начала измерения. Статистические оценки дифракционных ошибок при разных задержках начала регистрации, приведенные для степенного распределения максимальных амплитуд метеорных эхо, экспериментального распределения величин наклонных дальностей и экспериментального распределения скоростей из монографии Мак-Кинли [6], показали, что при задержке порядка 15 мсек число дифракционных фазовых сдвигов, больших 20° , уменьшается до 10—12% общего числа регистраций, а при 27 мсек — до 3—4%, что уже не противоречит допустимой погрешности.

Задержка начала измерения принята 25 мсек; она изменяется по желанию экспериментатора в пределах 10—50 мсек. Формирование строба может быть произведено при наличии отражения лишь тогда, когда с устройства задержки поступит импульс разрешения на измерение. Импульс-строб управляет селектором трехразрядного десятичного счетчика 5. Длительность строба измеряется методом заполнения временного интервала счетными импульсами от генератора 7 с последующим их счетом. Результаты счета индицируются цифровым регистратором 6. Согласно методике измерения дрейфов [1], необходимо знать число импульсов посылки в периоде доплеровских биений, тогда

$$V_p = \frac{\lambda}{2T_D} = \frac{\lambda}{2T_n N}, \quad (2)$$

где T_n — период повторения зондирующих импульсов ($T_n = 2$ мсек);
 N — число импульсов в периоде;

$$V_p = 250 \frac{\lambda}{N}. \quad (3)$$

Для повышения точности измерения малых скоростей дрейфа кратковременных отражений в приемном устройстве 1 реализован способ искусственного увеличения доплеровского сдвига частоты. Сущность его в преобразовании принимаемого сигнала таким образом, чтобы за время существования метеорного отражения сформировалось столько периодов колебаний, кратных периоду Допплера, сколько их необходимо для обеспечения заданной точности измерения скорости. Суть примененного метода состоит в следующем: частоту принимаемого сигнала, равную

$$f_c + f_d,$$

где f_c — несущая или промежуточная частота отраженного сигнала,

f_d — доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный скорости дрейфа метеорных следов (величина, подлежащая измерению), и частоту когерентного гетеродина, которая равна f_c , умножают в n раз, получая на выходе множителей частоты

$$nf_c + nf_d \text{ и } nf_c.$$

Умноженные частоты подают на фазовый детектор, на выходе которого регистрируют сигнал с частотой nf_d . Период регистрируемых колебаний в n раз меньше периода Допплера и, следовательно, за то же время существования метеорного отражения успевает сформироваться несколько периодов умноженной частоты Допплера, что достаточно для

измерения умноженной частоты с заданной точностью (рис. 2). Последующее вычисление скорости дрейфа производят по известному соотношению (1) с учетом коэффициента умножения частоты n

$$V_D = \frac{\lambda f'_D}{2n}, \quad (4)$$

где f'_D — доплеровский сдвиг частоты, регистрируемый на выходе фазового детектора без учета пресобразования сигнала.

В импульсно-доплеровских системах выбор больших коэффициентов умножения может привести к неоднозначности при определении больших скоростей. В нашем случае $n = 2$. Необходимо отметить, что предлагаемый метод увеличения скорости

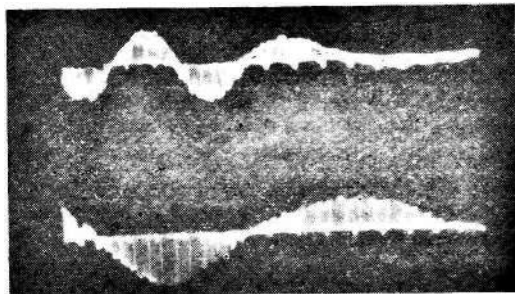


Рис. 2. Пример фоторегистрации фазовременных записей при $n = 2$ и $n = 1$.

набега фазы от импульса к импульсу еще более эффективно реализуется при потенциолоскопическо-векторном методе автоматической обработки радиометеороной информации.

Блок определения знака 10 — устройство с двумя устойчивыми состояниями равновесия, управление которым производится сигналами, поступающими из выходных устройств 3 и 9. Сигнал с выхода устройства 9 дифференцируется и в зависимости от полярности

продифференцированного сигнала поступает на соответствующую схему И, где сравнивается с выходным сигналом входного устройства 3. Сигнал, полученный в результате сравнения, управляет триггером с отдельным запуском. Последний коммутирует ключи и устройства знака цифрового регистратора.

Блок автоматического управления 8 вырабатывает сигналы, управляющие работой автоматического измерителя периода доплеровских биений в требуемой последовательности.

К этим сигналам относятся:

- 1) импульс сброса, устанавливающий перед каждым измерением в состояние «0» счетные декады;
- 2) строб — импульс, длительность которого определяет время измерения, т. е. время, в течение которого открыт путь для счетных импульсов к счетным декадам;
- 3) сигналы, служащие для установления заданного времени индикации.

В цифровом регистраторе 6 применен наиболее совершенный и простой трехразрядный цифровой индикатор на газоразрядных лампах типа ИН-1, отличающийся малой инерционностью и позволяющий провести регистрацию без специальных устройств, путем кино съемки. С помощью цифрового индикатора индицируется результат измерения периода доплеровских биений. Для индикации знака доплеровского сдвига частоты применены импульсные неоновые лампы с торцевым свечением, которые высвечивают табло со знаком (+) или (—), в зависимости от знака скорости дрейфа лоцируемой неоднородности. Применен транзисторно-диодный дешифратор, который пресобразовывает двоично-десятичный код 1—2—4—8 в десятичный. Трехразрядный счетчик 5 построен по обычной

схеме с потенциальным сбросом. При реализации полностью автоматизированных систем обработки и передачи информации предусматривается выход на телетайп и ЦВМ предварительной обработки.

Результаты эксперимента

Для оценки достоверности результатов автоматической обработки производилась параллельная регистрация осциллографических фазовременных записей и цифровых результатов измерения параметров дрейфа ионизированного следа (рис. 3) на фотопленку. Результаты осциллографических регистраций подвергались обработке по известной методике [1].

Эффективность цифровой обработки оценивалась по 1077 регистрациям. Анализ проводился методом сравнения результатов цифровой обработки с результатом обычной обработки информации по фазовременным записям доплеровского смещения частоты. Количество отражений, обработанных цифровым методом с погрешностью не больше 20%, составляет 42,5% общего количества регистраций, с погрешностью не более 10%—25%. Сбои в работе устройства определения знака вектора скорости не превышают 11,5%; процент сбоев цифровой системы обработки — 17,5%. Сбои обусловлены воздействием на систему импульсных помех, а также наличием федингующих отражений (9,85%).

Для выяснения причин ошибок в работе автоматического устройства на фотопленку регистрировались также эпюры напряжений на выходе наиболее важных узлов системы. Полученная в результате обработки средняя квадратичная ошибка выделения огибающей фазовременной записи доплеровского смещения частоты пик-детектором входных устройств не превышает 5,6%. Процентное содержание фазовременных записей, у которых переход функции через нуль выделен входными устройствами с погрешностью не более 20%, составляет 66,5% общего количества обработанных отражений с погрешностью не хуже 10%—34,5%.

Процент пропусков срабатывания цифрового регистратора не более 7,65%.

Основная причина ошибок при цифровой обработке — воздействие импульсных помех на счетчик и на логику системы. В дальнейшем такого рода ошибки и сбои могут быть устранены за счет улучшения помехозащиты каналов обработки и улучшения логики.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и испытана автоматическая система обработки дрейфов метеорных радиоотражений.
2. Испытан предложенный метод увеличения скорости набега фазы, который позволяет в дальнейшем реализовать еще более эффективную систему автоматической обработки и анализа результатов наблюдений.

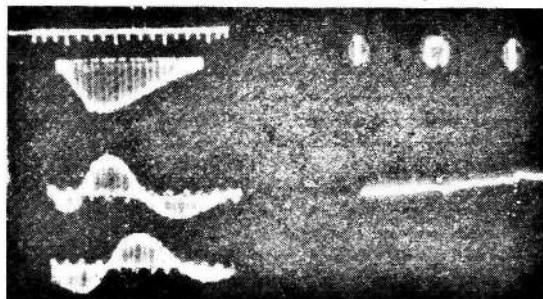


Рис. 3. Пример одновременной регистрации параметров дрейфа метеорных следов (цифры в правом верхнем углу обозначают длительность периода доплеровских биений, полученных при автоматическом измерении).

3. Экспериментально подтверждены возможности системы автоматической обработки информации.

4. Полученные результаты говорят о том, что определяющим при проектировании радиолокационных автоматизированных комплексов измерения дрейфов по метеорным наблюдениям является АСОИ (автоматизированная система обработки информации).

5. Предлагаемая методика обработки дрейфов может быть применена для базисных регистраций координат на точку отражений, а, следовательно, избавит современную методику измерений направлений и высот дрейфа от существенных недостатков, имеющих в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Лысенко. «Астрономический журнал», 40, 161, 1963.
2. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. «Метеорные явления в атмосфере Земли». Серия «Результаты исследований по международным геофизическим проектам». Изд-во «Наука», 1966.
3. И. А. Делов, М. Ф. Лагутин, И. А. Лысенко. Исследование некоторых параметров турбулентных движений методом радиолокации метеорных следов. «Изв. вузов, Радиофизика», VII, № 2, 1964.
4. В. В. Сидоров. «Радио-метеорные методы и аппаратура для наблюдения движений верхней атмосферы». Автореф. канд. дисс., Казань, 1963.
5. М. Ф. Лагутин, В. П. Онуфриев, Т. П. Петручек. Увеличение разрешающей способности измерения скорости дрейфа метеорного следа. Доклад на XII Пленуме Комиссии по Кометам и метеорам Астросовета АН СССР.
6. D. W. R. Mc. Kinley. Meteor Science and Engineering, 1961.