

## НОВЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКОВ МЕТЕОРОВ В ПОДСИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАНТОВ И ОРБИТ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ (ПАОРО) РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА МАРС ХНУРЭ

### Введение

Одной из важнейших задач метеорной астрономии является изучение законов распределения метеорного вещества в околоземном и межпланетном космическом пространстве. В основе таких исследований лежат наблюдения метеоров, результаты которых при определенных упрощениях позволяют построить эмпирические распределения параметров орбит метеорных тел, либо проверить теоретические выводы и модели.

В Харьковском национальном университете радиоэлектроники накоплен обширный наблюдательный материал, полученный радиолокационным методом на автоматической метеорной радиолокационной станции МАРС ХНУРЭ. По мере накопления наблюдательных данных, совершенствования методики проведения наблюдений и обработки их результатов все более важное значение приобретает количественная интерпретация результатов наблюдений, т.е. получение состоятельных и несмещенных количественных оценок параметров иследуемых распределений.

Пользуясь терминологией математической статистики, можно отметить, что результаты наблюдений метеоров представляют собой выборку из генеральной совокупности, которой является весь комплекс исследуемых метеорных тел вблизи орбиты Земли. При определенных условиях, исследуя выборку, можно с необходимой степенью точности охарактеризовать генеральную совокупность. Такими условиями являются отсутствие систематических и грубых ошибок измерений, достаточный объем выборки и репрезентативный способ отбора при составлении выборки. Последнее означает, что отобранная группа объектов должна полно характеризовать всю совокупность, из которой был сделан отбор.

Одними из важнейших условий правильного применения статистических методов обработки наблюдений являются независимость и однородность наблюдений. В тех случаях, когда о всей совокупности известно мало, гарантией репрезентативности может служить случайный отбор. В таком случае увеличение объема выборки приводит к улучшению статистических оценок результатов наблюдений. Но при радиолокации метеоров объекты генеральной совокупности попадают в статистический материал не только по случайным причинам. В этом случае выборка является искаженной из-за селективности метода наблюдений. Отметим, что селективность наблюдений метеоров обуславливает наличие в статистических оценках систематической ошибки, которую уменьшить путем увеличения объема выборки невозможно. Учет селективности наблюдений метеоров к тем или иным параметрам является одной из основных задач при астрономической интерпретации результатов наблюдений целью получения достоверных характеристик распределений метеорного вещества в Солнечной системе.

Важной задачей астрономической интерпретации результатов радионаблюдений метеоров является выделение метеорных потоков из общей совокупности зарегистрированных метеороидов. Это позволяет не только разделить генеральную совокупность на два класса – потоковые и спорадические метеоры – но и выявить отличия в распределениях элементов орбит для каждого из классов. Кроме того, это позволяет проводить поиск гипотетических родительских тел потоков среди комет и астероидов.

Метеорные потоки концентрируются вблизи средних орбит, которые существенно отличаются друг от друга. Однако у всех средних орбит метеорных потоков имеется одно важное сходство – они всегда пересекаются с орбитой Земли. Условия такого пересечения у них

сильно отличаются и, следовательно, сравнивать метеорные потоки по количеству метеоров, включенных в данный поток некорректно. Чтобы можно было проводить такое сравнение, необходимо исключить (или ослабить) влияние условий пересечения средней орбиты потока с орбитой Земли, т.е. анализировать все потоки в фиксированном поперечном сечении, например, в перигелии средней орбиты.

В настоящей статье предлагается усовершенствованный алгоритм вторичной обработки сигналов в подсистеме ПАОРО комплекса МАРС, который позволяет:

- путем учета факторов замечаемости радионаблюдений метеоров рассчитывать истинные распределения параметров орбит метеорных тел в Солнечной системе непосредственно во время сеанса наблюдений;
- на основе кластер-анализа генеральной совокупности зарегистрированных метеорных тел выявлять метеорные потоки и производить их сравнение путем вычисления плотности потока в перигелии средней орбиты.

### Радиолокационный комплекс МАРС ХНУРЭ

Система МАРС предназначена для сбора информации о метеорных явлениях при решении астрономических, геофизических и прикладных задач. С помощью МАРС можно определять или рассчитывать следующие данные о метеорных телах и атмосфере Земли:

- время появления и наклонную дальность до отражающей области на метеорном следе;
- угловые координаты и высоту отражающей области метеорных следов;
- скорость, координаты радианта и элементы орбит метеорных тел;
- распределения отраженных сигналов по амплитуде и длительности;
- распределение метеорных тел по массе;
- радиальную составляющую скорости ветра в метеорной зоне атмосферы;
- коэффициент амбиполярной диффузии.

Эти параметры определяются системой автоматически с выдачей результатов в цифровой форме. Кроме того, имеется возможность исследовать начальный радиус метеорных следов, оценить распределение ионизации вдоль следа, величину торможения метеорного тела в атмосфере и проводить другие исследования в полуавтоматическом режиме.

В соответствии со своим назначением и комплексом используемых средств в автоматизированной системе МАРС можно выделить следующие подсистемы:

- подсистему автоматического определения радиантов и орбит метеоров (ПАОРО);
- статистический анализатор численности метеорных отражений (САЧМО);
- автоматический угломер (АУ);
- ветровой автомат (ВЕТА).

Укрупненная функциональная схема системы показана на рис. 1. Устройство управления (УУ) координирует работу всех устройств системы. Оно состоит из синхрогенератора, вырабатывающего необходимые импульсные сигналы, и блока опорных частот, задающего рабочую частоту радиопередающего устройства (РПУ) и формирующего гетеродинные напряжения для радиоприемного устройства (РПрУ).

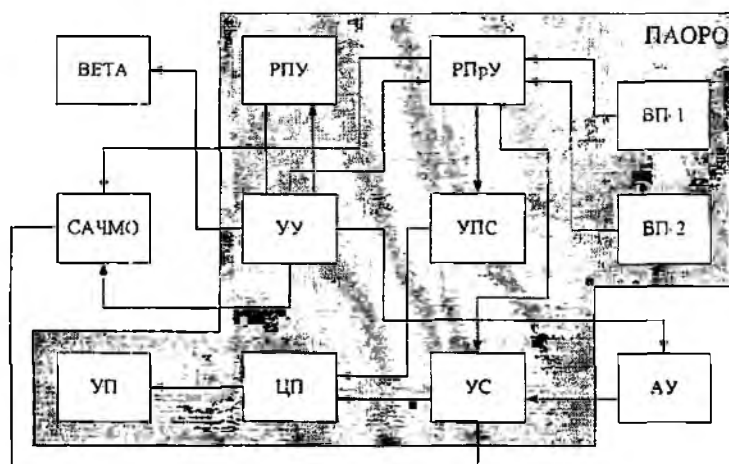


Рис. 1

В системе МАРС излучение и прием осуществляются на отдельные антенны, разнесенные на расстояние 260 м, в непосредственной близости от которых размещены соответственно РПУ и приемно-регистрационная аппаратура. Управление РПУ производится оператором либо дистанционно – из помещения, где расположена приемно-регистрационная аппаратура – либо непосредственно с пульта передатчика. РПУ реализовано по супергетеродинной схеме, в которой предусмотрена возможность изменения частоты повторения и длительности импульсов для проведения когерентно-импульсных измерений. Усилитель мощности представляет собой симметричный четырехкаскадный усилитель радиоимпульсов с коэффициентом усиления по мощности порядка  $10^4$  и с номинальной выходной мощностью 1 МВт. РПУ состоит из шести импульсных радиоприемников супергетеродинного типа. Три приемника входят в состав подсистемы ПАОРО и осуществляют прием отраженного от метеорного следа полезного сигнала в основном пункте и прием ретранслированных сигналов с двух вынесенных пунктов. По одному приемнику имеют в своем составе автоматический угломер, ветровой автомат и подсистема САЧМО.

Устройство предварительной обработки (УПО) выделяет полезные (метеорные) сигналы на фоне шумов и помех, формирует командные сигналы (импульсы запуска), разрешающие прием радиометеорной информации, осуществляет временную селекцию сигналов (селекцию по дальности) для разделения одновременно существующих метеорных отражений и запрещает повторный запуск одним и тем же метеором в случае длительно существующих отражений.

Устройство сопряжения (УС) служит для связи различных устройств системы с вычислительной частью системы (центральным процессором – ЦП). Одной из главных функций УС является преобразование радиометеорной информации в цифровую форму. Кроме того в УС имеются схема измерения дальности. Результаты вычислений выдаются на устройство печати (УП).

Вынесенные пункты (ВП-1) и (ВП-2) обеспечивают разнесенный прием радиосигналов рассеянных на метеорном следе, и ретрансляцию их в основной приемно-регистрационный пункт. Вынесенные пункты состоят из приемника метеорного сигнала, работающего на основной частоте системы МАРС, приемника сигнала опорной частоты, преобразователя частоты, усилителя мощности и антенных устройств. Оба пункта одинаковы за исключением частот ретрансляции. Гетеродинные напряжения для преобразователей частоты формируются либо из сигналов внутренних кварцеванных генераторов, либо из принимаемой опорной частоты. Формирование всех гетеродинных напряжений от общего источника, находящегося в УУ системы, позволяет обеспечить когерентность вынесенных пунктов, что необходимо при геофизических исследованиях. Опорное напряжение передается из основного пункта в вынесенные по специальной радиолинии. ВП-1 и ВП-2 находятся на расстоянии от основного пункта приблизительно 4 и 8 км соответственно. Угол между базами составляет  $76^\circ$ .

Описанные устройства совместно с вынесенными приемно-ретранслирующими пунктами ВП-1 и ВП-2 составляют подсистему автоматического определения радиантов и орбит метеоров.

Антенная система основного пункта состоит из отдельных передающей и приемной антенн. Обе антенны однотипны, каждая из них представляет собой линейку из 20 широкополосных биконических вибраторов, помещенных в уголкового рефлектора с углом раствора  $60^\circ$ . Рефлектор образуется двумя проволочными сетками длиной 193 м и шириной 27 м, натянутыми под углом 15 и  $75^\circ$  к горизонту. С помощью уголкового отражателя формируется диаграмма направленности антенн в вертикальной плоскости. Антенны ориентированы на восток, ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню  $0.5P_{\max}$  составляет  $5^\circ$  в горизонтальной плоскости и  $30^\circ$  в вертикальной плоскости, максимум излучения – под углом  $45^\circ$  к горизонту. Применение прогрессивного шага между вибраторами при синфазной равноамплитудной их запитке позволяет снизить уровень боковых лепестков до минус 20 дБ. Уровень излучения в задней полуплоскости не превышает минус 40 дБ.

В качестве приемных антенн в вынесенных пунктах применены двойные горизонтальные ромбы с КНД  $G = 30$ . Для ретрансляции сигналов используются пятиэлементные антенны типа «волновой канал».

Основные технические данные системы МАРС следующие:

- рабочая частота – 31.1 МГц;
- мощность передатчика в импульсе – 1 МВт;
- частота повторения импульсов – 500 Гц;
- длительность импульсов – 30 мкс;
- коэффициент усиления антенн в основном пункте – 250;
- чувствительность приемников – 5 мкВ;
- минимальная линейная электронная плотность метеорных следов, которые могут быть зарегистрированы МРЛС –  $5 \cdot 10^{10}$  эл/м.

### Подсистема автоматического определения радиантов и орбит метеорных тел

Задача подсистемы ПАОРО – в реальном масштабе времени выдача на печать основных астрономических характеристик индивидуальных метеоров: времени, скорости, координат радианта, элементов орбит. Задержка между появлением радиометеора и выдачей результатов определяется только общим временем обработки информации. Такая постановка задачи предопределяет реализацию ПАОРО на базе электронной вычислительной машины, так как расчет орбиты метеорного тела за короткое время (приемлемое для функционирования системы в реальном масштабе времени) и с достаточной точностью может быть выполнен только с помощью ЭВМ. На этом же устройстве реализованы алгоритмы первичной обработки и диспетчеризации. Такая система автоматической обработки позволяет более оперативно и с меньшими аппаратными затратами получать необходимую информацию о радиантах и орбитах индивидуальных метеоров.

Для определения скоростей и координат радиантов индивидуальных метеоров используется импульсно-дифракционный метод с приемом отраженных сигналов в трех разнесенных пунктах. Основным для этого метода является определение экстремальных точек огибающей амплитудно-временной характеристики метеорного радиосигнала. Значения аргумента (время  $t$ ) для этих точек используются для расчета скорости метеорного тела и временных сдвигов между сигналами, принятыми в основном и в вынесенных пунктах, которые в дальнейшем используются для определения координат радианта и элементов орбиты зарегистрированного метеорного тела.

На этапе *первичной обработки* сигналов в подсистеме ПАОРО производятся следующие операции:

- обнаружение полезного сигнала в излучении на входе РПРУ;
- выделение сигналов, пригодных для расчета скорости и координат радиантов, путем последовательного применения квазиоптимального алгоритма обнаружения к выходным сигналам всех приемных каналов.

Всю совокупность входных сигналов можно разделить на пять основных типов [6]. Первый тип  $A_1$  включает в себя отражения от ненасыщенных следов с четко выраженной дифракцией. Отражения второго типа  $A_2$  характеризуются «замаскированной» дифракцией, что чаще всего вызвано расположением отражающей «точки» близко к началу или к концу следа. Третий тип  $A_3$  характеризует отраженные сигналы с почти постоянной амплитудой, модулированной шумовыми флуктуациями. Отраженные сигналы четвертого типа  $A_4$  происходят от «вспышечных» и перенасыщенных следов, дающих дифракцию «на подлете» или возрастающие дифракционные максимумы после формирования основной зоны Френеля. В пятый тип  $A_5$  включены все сигналы аномальной (относительно первого типа) формы от следов, искаженных ветром, дроблением, резонансом и т. д. Первый тип сигналов образует инфор-

мативный класс, остальные – неинформативный. На рис. 2. приведены огибающие (дифракционные картины) АВХ, характерные для всех пяти типов отражений.

Для выделения сигналов типа  $A_1$  из общей совокупности реализаций используется процедура определения признаков сигналов. В качестве признака, по которому можно уверенно распознать отражения типа  $A_1$  (исключить из дальнейшей обработки), используется убывание амплитуды максимумов, начиная с главного максимума амплитудно-временной характеристики (АВХ). За главный максимум принимается экстремум с максимальной амплитудой из числа зарегистрированных.

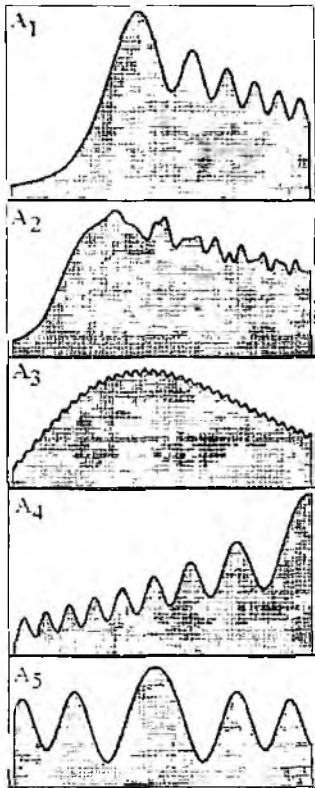


Рис 2

Чтобы вынести решение о том, действительно ли найденные экстремальные точки соответствуют дифрагирующему метеорному отражению – критерию отбора отражений типа  $A_1$  и  $A_2$  (исключение из дальнейшей обработки отражений типа  $A_3$  и  $A_4$ ), используется признак постоянства значений величины  $\delta$ , определяемой выражением [6]:

$$\delta = \frac{\Delta t_{i,j}}{\Delta t_{i,j}^H},$$

где  $i, j$  – номера экстремумов из данной выборки;  $\Delta t_{i,j}^H$  – нормировочные размеры зон Френеля, определяемые из теоретических соотношений.

Для разделения отражений типа  $A_1$  и  $A_2$  используется признак, характеризующий глубину дифракционных флуктуаций амплитуды [6]:

$$E = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m |y_{i+1} - y_i|,$$

где  $m$  – число экстремумов,  $y_i$  – амплитуда  $i$ -го экстремума. При значении параметра  $E > 0.05$  с высокой степенью точности принимается решение о принадлежности данного сигнала к типу  $A_1$ .

Для надежной оценки параметров орбит метеорного тела по принятым в трех пунктах сигналах необходимо иметь достаточное количество независимых исходных данных. Таким данными являются экстремумы АВХ. Поэтому число зарегистрированных экстремумов так же используется в качестве признака, по которому проводится распознавание реализаций. Количество требуемых зарегистрированных экстремумов определяется из условий второй обработки отраженного сигнала и в рассматриваемой системе равно 3.

Для снижения дисперсии выбранных признаков производится преобразование входных реализаций, заключающееся в фильтрации принятых сигналов и в интерполяции значений аргумента для экстремальных точек амплитудно-временной характеристики. Применение линейной фильтрации принятой реализации методом скользящего сглаживания позволяет в счет выбора соответствующего интервала осреднения представить сигнал полиномом невысокой степени и применить простейшие сглаживающие фильтры с конечным временем переходных процессов. Для сглаживания полученных реализаций и определения экстремальных точек применяются последовательно воспроизводящий и дифференцирующий фильтры.

Дискретную амплитудно-временную характеристику отраженного сигнала на интервал осреднения удобно рассматривать как функцию номера отсчета  $n = t/\Delta t$ . Аппроксимирем

оггибающую АВХ полиномами Чебышева. можно получить следующую формулу для оценки сигнала, отраженного от метеорного следа, в точке  $n$  интервала усреднения [6]:

$$y(n) = \sum_{i=1}^N B_i(n)x(i), B_i(n) = \sum_{k=0}^r \left[ \varphi_k' \cdot \varphi_k(n) \cdot \sum_{i=1}^N \varphi_k^{-2}(i) \right], \quad (3)$$

где  $x(i)$  – выборочное значение входной реализации в точке  $i$ -го интервала осреднения;  $\varphi_k(n)$  – полиномы Чебышева  $k$ -й степени;  $r$  – степень старшего полинома Чебышева ( $r=2$ );  $N$  – количество выборочных точек на интервале осреднения ( $N=5$ ).

Значение аргумента каждого экстремума фиксируется при перемене знака на выходе дифференцирующего фильтра. Для оценки производной от входной реализации также используется аппроксимация полиномами Чебышева второй степени на интервале  $N=5$ . При этом весовые коэффициенты дифференцирующего фильтра вычисляются по формуле (3). в которую вместо полиномов  $\varphi_k(n)$  подставляются значения производных  $\varphi_k'(n)$ . Оценки сглаженного сигнала определяются для тех же моментов времени, для которых заданы отсчеты входной реализации. Оценки производной от АВХ вычисляются для центров интервалов между соседними отсчетами входной реализации. Это позволяет фиксировать отсчет с номером  $k$  в качестве предварительного значения экстремума, если оценки производной для моментов  $k+0.5$  и  $k-0.5$  имеют противоположный знак.

На этапе *вторичной обработки* сигналов в подсистеме ПАОРО производится расчет скорости, координат радианта и элементов орбит зарегистрированных метеорных тел.

При помощи дифракционных картин АВХ вычисляется видимая скорость  $v_0$  и координат радианта зарегистрированных метеорных тел. Для комплекса МАРС в [1, 7] приведены следующие выражения:

для видимой скорости  $v_0$

$$v_0 = \Delta v_{\text{ТОРМ}} + v_{\text{СР}} = 0.6500 + 1.0398 v_{\text{СР}} = 0.6500 + 1.0398 \frac{C \cdot \sqrt{R} \sum_{m=1}^3 (n-1)_m}{\sum_{m=1}^3 (n-1)_m \Delta M_{23}^m}; \quad (4)$$

для азимута  $A$ :

$$\begin{cases} \tau_1 > 0 \\ \tau_2 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = A_{ГЛ} + \pi \text{ при } A_{ГЛ} > 0 \\ A = A_{ГЛ} \text{ при } A_{ГЛ} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_1 \leq 0 \\ \tau_2 < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = A_{ГЛ} \text{ при } A_{ГЛ} > 0 \\ A = A_{ГЛ} + \pi \text{ при } A_{ГЛ} < 0 \end{cases} \\ \begin{cases} \tau_1 < 0 \\ \tau_2 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = A_{ГЛ} + \pi \text{ при } A_{ГЛ} > 0 \\ A = A_{ГЛ} \text{ при } A_{ГЛ} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_1 > 0 \\ \tau_2 \leq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = A_{ГЛ} \text{ при } A_{ГЛ} > 0 \\ A = A_{ГЛ} + \pi \text{ при } A_{ГЛ} < 0 \end{cases}; \quad (5)$$

$$A_{ГЛ} = \text{arctg} \left( \frac{0.8273\tau_2 + 0.6749\tau_1}{1.8272\tau_1 - 0.5616\tau_2} \right)$$

для среднего видимого зенитного угла  $Z_{\text{СР}}$  радианта:

$$Z_{\text{СР}} = \begin{cases} 0.5(Z_1 + Z_2) \text{ при } |Z_1 - Z_2| < 4^\circ \text{ и } \tau_1 \neq 0, \tau_2 \neq 0 \\ Z_2 \text{ при } \tau_1 = 0 \\ Z_1 \text{ при } \tau_2 = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

В выражениях (4) – (6) используются следующие функциональные зависимости и переменные:

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^3 (M_i^1 - M_i^2) \quad (7)$$

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^3 (M_i^1 - M_i^3)$$

$$\sin(Z_1) = -\frac{0.9252 \cdot 10^{-3} v_{CP} \cdot \tau_1}{\cos(A - 34.1711^\circ)} \quad (8)$$

$$\sin(Z_2) = -\frac{4.7490 \cdot 10^{-4} v_{CP} \cdot \tau_2}{\cos(A - 110.2727^\circ)}$$

$C$  – коэффициент, зависящий от рабочей частоты РЛС и параметров зондирующего сигнала;  $R$  – наклонная дальность до зеркальной точки отражения на метеорном следе относительно основного пункта;  $\Delta M_{23}^m$  – размер зоны Френеля между первым минимумом и вторым максимумом дифракционной картины АВХ с индексом  $m$ ;  $M_i^m$  – временное положение  $i$ -го экстремума дифракционной картины АВХ с индексом  $m$ ;  $n$  – количество зарегистрированных экстремумов огибающей АВХ;  $m$  – индекс огибающей АВХ ( $m = 1$  для основного пункта,  $m = 2$  и  $m = 3$  для двух выносных пунктов).

Зенитный угол радианта, исправленный за притяжение Земли:

$$Z = Z_{CP} + \Delta Z = Z_{CP} + 2 \arctg \left[ \frac{\sqrt{v_0^2 - 123.2 - v_0}}{\sqrt{v_0^2 - 123.2 + v_0}} \operatorname{tg} \left( \frac{Z_{CP}}{2} \right) \right] \quad (9)$$

На основе даты наблюдения метеора, рассчитанных значений  $v_0$ ,  $A$  и  $Z$  по методике [8] вычисляются характеристики метеороида, породившего зарегистрированный метеор: склонение  $\delta$  и прямое восхождение  $\alpha$  радианта; геоцентрическая скорость  $v_g$ ; внеатмосферная скорость  $v_\infty$ ; широта  $\beta$  и долгота  $\lambda$  радианта; гелиоцентрическая скорость  $v_h$ ; широта  $\beta'$  и долгота  $\lambda'$  истинного радианта; наклонение  $i$  и эксцентриситет  $e$  орбиты; большая  $a$  и малая  $b$  полуоси орбиты; расстояния перигелия  $q$  и афелия  $Q$ ; истинная аномалия  $v$ ; аргумент перигелия  $\omega$ ; долгота восходящего узла  $\Omega$ .

Блок-схема алгоритма обработки сигналов в подсистеме ПАОРО представлена на рис. 3.

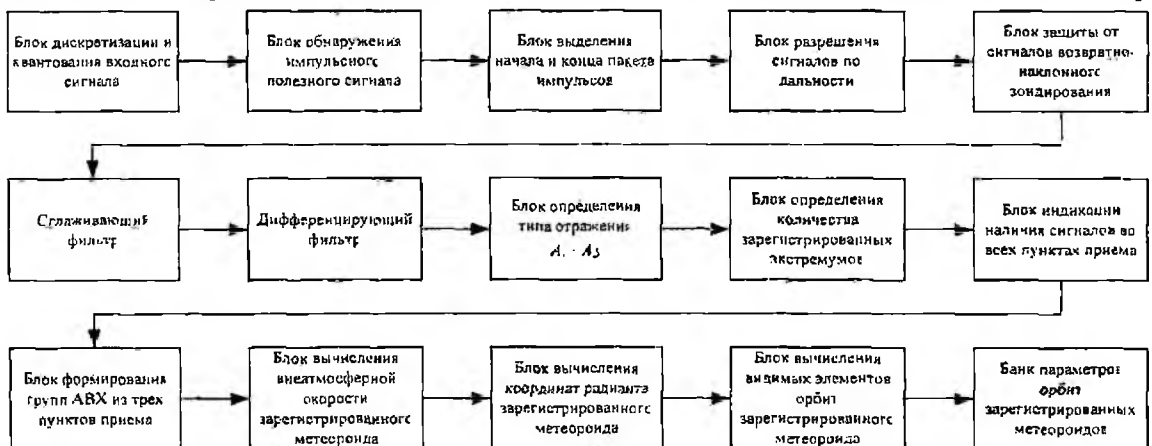


Рис. 3

## Усовершенствование алгоритма вторичной обработки сигналов в подсистеме ПАОРО комплекса МАРС

Результатом обработки сигналов в подсистеме ПАОРО является выдача на носитель сведений о дате наблюдения метеора, скорости породившего его метеороида, координатах радианта и его элементов орбиты. Однако, как указывалось во введении, эти выходные данные сильно искажены селекцией радионаблюдений. Поэтому для расчета истинных распределений параметров орбит метеорных тел в Солнечной системе и корректного сравнения метеорных потоков по интенсивности необходимо разработать алгоритм, который решал бы три задачи:

*Первая задача.* Учет, по возможности, всех факторов селективности радионаблюдений метеоров, что позволит более корректно оценивать распределения параметров орбит зарегистрированных метеороидов.

Методические вопросы избирательности радиолокационных наблюдений метеоров рассмотрены в [1]. При статистической обработке результатов измерений параметров индивидуальных метеоров наиболее широко применяется метод весовой обработки, когда каждому зарегистрированному метеору присваивают вес, обратно пропорциональный вероятности наблюдения метеора с данными параметрами. Этот весовой коэффициент можно представить в виде произведения четырех сомножителей – факторов селективности – аппаратурно-методического фактора, обусловленного техническими характеристиками аппаратуры и особенностями проведения наблюдений, геометрического фактора, характеризующего вероятность наблюдения метеоров в зависимости от координат радианта, физического фактора, определяющего относительное количество регистрируемых метеоров в зависимости от их скорости и наклона траектории, и астрономического фактора, характеризующего вероятность пересечения данной орбиты метеора с орбитой Земли.

Решение задачи 1 рассмотрено в [2, 3, 4] и предполагает использование усовершенствованных авторами данной статьи ныне существующих методик расчета факторов замечаемости радионаблюдений метеорных тел:

- физического фактора как функции зенитного расстояния радианта, а также учета отражения радиоволн от насыщенных и ненасыщенных следов метеорных тел;
- геометрического фактора как функции диаграммы направленности антенной системы РЛС, геоцентрических координат ее положения и гелиоцентрических координат радиантов радиометеоров.
- астрономического фактора как функции вероятности, соответствующей диапазону гелиоцентрических скоростей, с которыми возможна регистрация на РЛС метеора в данный момент времени, в распределении гелиоцентрических скоростей, исправленному за физический и геометрический факторы замечаемости.

*Вторая задача.* Кластер-анализ генеральной совокупности зарегистрированных метеороидов с целью выявления метеорных потоков. Решение задачи 2 рассмотрено в [5] и базируется на алгоритме кластер-анализа ФОРЕЛЬ с использованием случайного перебора центров кластеров (средних орбит гипотетических потоков), расчета на каждом этапе поиска нескольких вариантов таксономии и многошаговой процедуры отсева случайных группировок орбит. Авторы обработали выборку из 123077 орбит, полученную на комплексе МАРС по результатам радиометеорных исследований в 1972–1978 годах. Выделено 5160 потоков, из которых 3729 включают в себя 10 и более орбит.

*Третья задача.* Разработка методики расчета пространственной плотности метеорных потоков в перигелии их средних орбит.

Блок-схема разрабатываемого алгоритма работы модуля обработки полученных результатов измерений в подсистеме ПАОРО представлена на рис. 4. Рассчитанные параметры орбит радиометеороидов с блока вторичной обработки поступают на блоки №1 – 3 для расчета факторов замечаемости. Данные с этих блоков плюс рассчитанные параметры орбит  $\langle X \rangle$  по-

ступают на блок №4, где осуществляется расчет истинных распределений параметров орбит зарегистрированных радиометеороидов, и на блок №5, выходными данными которого является распределение метеорного вещества в Солнечной системе.

Для решения задачи сравнения метеорных потоков по интенсивности введены блок №6, в котором осуществляется выделение потоков из общей совокупности метеоров на базе кластер-анализа, и блок №7, в котором осуществляется пересчет топоцентрической плотности потока  $\Pi$  зарегистрированных метеороидов в некоторой области земной поверхности, определяемой координатами РЛС, в плотность потока в заданном поперечном сечении средней орбиты  $\Pi_{ORB}$  с учетом факторов замечаемости радионаблюдений метеоров.

Остановимся подробнее на методике перерасчета плотности потока  $\Pi$  в  $\Pi_{ORB}$ .

1. Переход от топоцентрической ( $\Pi$ ) плотности потока к геоцентрической [9]:

$$\Pi_g = \Pi \frac{2v_g^2}{v_g^2 + v_\infty^2},$$

2. Переход от геоцентрической плотности потока к гелиоцентрической [9]:

$$\Pi_h = \Pi_g \frac{v_h}{v_g},$$

3. Отношение плотностей в разных фиксированных сечениях средней орбиты [10]:

$$\frac{\Pi_1}{\Pi_2} = \frac{1 + e \cos(v_1)}{1 + e \cos(v_2)} \sqrt{\frac{1 + 2e \cos(v_1) + e^2}{1 + 2e \cos(v_2) + e^2}}.$$

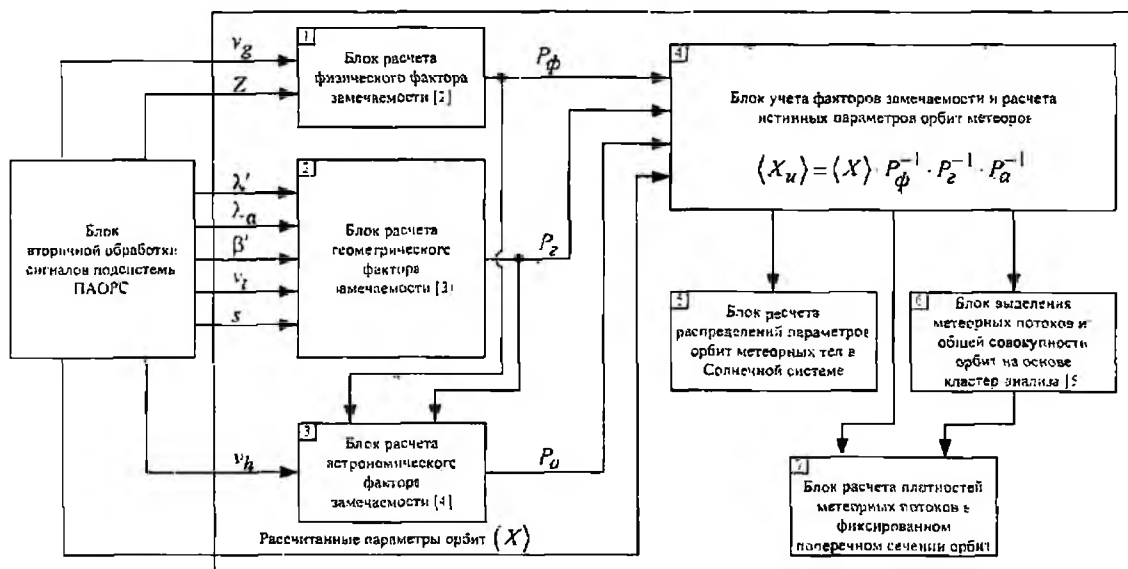


Рис. 4

Используя выражение (12), а также тот факт, что  $\Pi_h$  является плотностью потока в узле наблюдения, т.е. известно значение истинной аномалии узла наблюдения  $v_\Omega$ , можно рассчитать значение плотности метеорного потока в перигелии средней орбиты:

$$\Pi_v = \Pi \frac{2v_g v_h}{v_g^2 + v_\infty^2} \cdot \frac{(1+e)^2}{1 + e \cos(v_\Omega)} \sqrt{\frac{1}{1 + 2e \cos(v_\Omega) + e^2}} = \Pi \cdot k_a. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что функция  $k_q$  в формуле (13) представляет собой алгоритм учета влияния углового расстояния угла перигелия на структурные характеристики метеорных потоков – астрономического фактора. Однако использовать рассчитанные плотности потока в перигелии средней орбиты  $\Pi_q$  для сравнения метеорных потоков по интенсивности не корректно. Дело в том, что на структурные характеристики метеорных потоков также оказывает влияние гравитация Солнца, и чем меньше значение перигелийного расстояния  $q$  средней орбиты потока, тем сильнее сказывается на характеристиках потока фактор солнечной гравитации. Следовательно, для корректности сравнения потоков необходимо учесть различия в перигелийных расстояниях. Это можно сделать, если  $\Pi_q$  пронормировать к стандартному гелиоцентрическому расстоянию  $q_0 = 1$  а.е. [10]:

$$\Pi_{qst} = \Pi_q \cdot q^{2.5}. \quad (14)$$

4. Учет физического и геометрического факторов селективности для каждого метеорного потока путем расчета весового коэффициента:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{P_{\phi_i} \cdot P_{r_i}} \right), \quad (15)$$

где  $N$  – количество метеоров в данном потоке.

5. Расчет истинной  $\Pi_q^H$  плотности метеорного потока в перигелии средней орбиты:

$$\Pi_q^H = \Pi \cdot k_a \cdot W_{\Sigma}. \quad (16)$$

6. Расчет истинной приведенной для сравнения  $\Pi_{qst}^H$  плотности метеорного потока в перигелии средней орбиты:

$$\Pi_{qst}^H = \Pi \cdot k_a \cdot W_{\Sigma} \cdot q^{2.5}. \quad (17)$$

В таблице приведены результаты расчета коэффициентов  $k_a$ ,  $k_a \cdot W_{\Sigma}$  и  $k_a \cdot W_{\Sigma} \cdot q^{2.5}$  для нескольких интенсивных метеорных потоков из базы ХНУРЭ. Здесь приняты следующие обозначения: Sh1 – поток из базы ХНУРЭ,  $\Pi_h$  – усредненная за 1 час плотность зарегистрированных метеоров в потоке;  $q$  – перигелийное расстояние средней орбиты потока Sh1; Sh2 – идентифицированный поток Sh1 по базам данных метеорных потоков Лебединца [11], Секанины [12] и Терентьевой [13];  $Dcr$  – значение  $D$ -критерия между потоками Sh1 и Sh2;  $\Pi_{hq}$  и  $\Pi_{hqst}$  – плотность  $\Pi_h$  в перигелии и в приведенном перигелии средней орбиты с учетом факторов замечаемости соответственно.

Плотность  $\Pi_{hq}$  в перигелии средней орбиты зависит от следующих факторов: во-первых, от наблюдаемой плотности потока  $\Pi_h$ ; во-вторых, от замечаемости радионаблюдений метеоров в месте расположения комплекса МАРС на Земле – большая замечаемость соответствует меньшему значению весового коэффициента  $W_{\Sigma}$ . В-третьих, условием встречи потока метеоров и Земли: – чем ближе точка пресечения к апогею средней орбиты потока, тем больше значение коэффициента  $k_a$ . Из приведенных в таблице радиометеорных потоков ХНУРЭ максимальной плотностью  $\Pi_{hq}$  обладает поток № 4756 (Геминиды), минимальной – № 4490 (Андромедиды). Стоит также отметить, что возможна ситуация, когда видимая плотность метеорного потока больше истинной: Земля встречается с потоком в перигелии его средней орбиты, а сам поток обладает высокой замечаемостью при радионаблюдениях – потоки № 22 (Квадрантиды) и № 1328 (ε-Лириды).

Sh1	$\Pi_h$	Sh2	$D_{cr}$	$q$	$k_a$	$k_a \cdot W_\Sigma$	$k_a \cdot W_\Sigma \cdot q^{2.5}$	$\Pi_{hq}$	$\Pi_{hqsr}$
4756	0.2285	Геминиды [9]	0.0553	0.1986	16.3436	7.0877	0.1246	1.6197	0.0285
22	0.0946	Квадрантиды [9]	0.0770	1.0239	0.8957	0.3992	0.4234	0.0378	0.0401
4468	0.0637	N-Тауриды [9]	0.0822	0.4258	5.4994	1.5221	0.1800	0.0969	0.0115
3319	0.0621	N-Аквариды [10]	0.0956	0.3726	7.8268	3.1680	0.2684	0.1968	0.0167
587	0.0547	Леониды [11]	0.0687	0.4935	4.6226	2.2378	0.3829	0.1225	0.0210
2126	0.0534	$\zeta$ -Персеиды [9]	0.0893	0.2943	9.3413	2.6116	0.1227	0.1394	0.0066
2069	0.0513	S-Тауриды [9]	0.0738	0.4859	4.9751	1.4045	0.2312	0.0721	0.0119
1328	0.0486	$\epsilon$ -Лириды [10]	0.0949	0.8301	1.7448	0.7080	0.4445	0.0344	0.0216
3933	0.0484	S-Ариетиды [10]	0.0827	0.4219	6.1111	2.2195	0.2566	0.1074	0.0124
5002	0.0424	$\chi$ -Ориониды [10]	0.0768	0.5769	3.9776	1.7272	0.4365	0.0732	0.0185
3199	0.0360	$\delta$ -Леониды [10]	0.0945	0.5448	4.0853	1.4770	0.3236	0.0532	0.0116
4955	0.0345	$\mu$ -Геминиды [10]	0.0907	0.3388	7.7135	2.1061	0.1407	0.0727	0.0049
1865	0.0343	$\omega$ -Тауриды [11]	0.0992	0.5689	4.0821	1.3254	0.3236	0.0455	0.0111
1453	0.0255	Виргиниды [11]	0.0973	0.6198	3.5792	3.2831	0.9931	0.0836	0.0253
4616	0.0224	Моносерида [10]	0.0960	0.1050	29.3765	21.2187	0.0757	0.4744	0.0017
4490	0.0188	Андромедиды [9]	0.0678	0.8544	2.4971	1.1027	0.7440	0.0208	0.0140

При сравнении потоков по интенсивности на первое место выходит значение перигелийного расстояния средней орбиты Земли, т.к. плотность  $\Pi_{hqsr}$  в приведенном перигелии согласно (18) равна произведению плотности  $\Pi_{hq}$  на коэффициент  $q^{2.5}$ . Для короткопериодических потоков с перигелийным расстоянием  $q \leq 0.2$  характерно резкое уменьшение значения  $\Pi_{hqsr}$  по сравнению с  $\Pi_{hq}$  (например, для потока № 4616 (Моносерида)). Для долгопериодических потоков с перигелийным расстоянием  $q \geq 1$  характерно увеличение значения плотности  $\Pi_{hqsr}$  по сравнению с  $\Pi_{hq}$ . Из приведенных в таблице радиометеорных потоков ХНУРЭ максимальной интенсивностью обладает поток № 22 (Квадрантиды), минимальной – № 4616 (Моносерида).

### Выводы

Предложенный усовершенствованный алгоритм вторичной обработки сигналов в подсистеме ПАОРО комплекса МАРС позволяет рассчитывать истинные распределения параметров орбит метеорных тел в Солнечной системе; выявлять принадлежность зарегистрированного метеорного тела к известным метеорным потокам и производить их сравнение путем вычисления плотности потока в перигелии средней орбиты. При этом вся обработка производится в реальном масштабе времени на ПЭВМ без участия оператора.

**Список литературы:** 1. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука. 1967. 260 с. 2. Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Уточнение методики учета физического фактора замечаемости при построении истинных распределений параметров радиометеоров // Радиотехника. 2007. Вып. 149. С. 62-68. 3. Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Оценка геометрического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т. 5, №4. Харьков: ХНУРЭ. С. 519-527. 4. Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Новый метод расчета астрономического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров // Радиотехника. 2007. Вып. 151. С. 246. 5. Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Подолька В.А. Метеорный комплекс вблизи Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 1. Методика выделения потоков и ассоциаций из выборки орбит индивидуальных метеоров большого объема // Астрон. вестн. 1995. Т. 29. № 5. С. 439-449. 6. Дьяков А.А. Исследование потока информации и вопросы автоматизации его обработки в метеорной радиолокации: Дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1972. 217 с. 7. Дьяков А.А., Кащеев Б.Л. Определение скорости радио метеора с минимальной среднеквадратической ошибкой // Астрон. вестн. 1972. Т. 6. № 2. С. 94-101. 8. Porter J.G. Comets and meteor streams. London. Chapman&Hall ltd. 1952. 124 p. 9. Лесин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе. М.: Изд-во АН СССР. 1956. 293 с. 10. Андреев Г.В. Учет влияния астрономической се-

лекции на структурные характеристики метеорных потоков // Астрон. вестн. 1984. Т. 18. №3. С. 240-248.  
11. Лебединец В.Н., Корпусов В.Н., Соснова А.К. Потоки радиометеоров // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 1 (34).  
С. 88 – 171. 12. Sekanina Z. Statistical model of meteor streams. IV. A study of radio streams from the synoptic  
year // Icarus. 1976. V. 27. P. 265–321. 13. Терентьева А.К. Орбиты малых метеорных роев. Астрон. цирку-  
ляр. № 249, 1, 1963; № 264, 1, 1963; № 415, 1, 1967; № 423, 1, 1967.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 21.11.2007*