

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данная работа посвящена исследованию алгоритма измерения скорости метеорного тела, реализованного в комплексе МАРС, выявлению "узких" мест в работе алгоритма и усовершенствованию последнего. В Проблемной НИЛ радиотехники Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники создана и работает с 1968 г. специализированная радиотехническая система МАРС, предназначенная для изучения атмосферы Земли на высотах 90...110 км, исследования метеоров радиолокационным методом. По результатам измерения параметров движущегося метеорного тела можно оценивать параметры, необходимые для организации метеорного канала связи. Кроме того, можно построить картину динамики развития комплекса малых тел Солнечной системы, что актуально в связи с решением проблемы кометно-астероидной опасности.

Основным параметром движущегося метеорного тела служит вектор скорости. Погрешность измерения скорости должна быть как можно меньше для получения достоверных результатов. Наиболее эффективным методом исследования действующего алгоритма измерения скорости является метод компьютерного имитационного моделирования (при условии правильно выбранной модели процедуры и аппаратуры регистрации).

При моделировании комплекса МАРС регулируемые и нерегулируемые факторы учитываются с помощью включения в алгоритм программы имитации математических моделей влияющих факторов: модели шума; физических моделей метеорного тела, его разогрева, прогрева насквозь, плавления, испарения, образования ионизированного следа; модели формирования сигнала, отраженного от метеорного следа; модели аппаратуры, производящей все виды обработки сигнала — предварительную (обнаружение сигнала и выделение его информационных параметров) и первичную (процедура определения скорости). Учитываются также экспериментально полученные распределения метеорных тел по скоростям и координатам радиантов (ориентации метеорного следа в пространстве), что во многом решает проблему учета избирательности системы по отношению к скорости.

Небесная сфера разделяется на  $N = 1600$  равновеликих участков, называемых площадками. Предполагается, что метеорные тела, радианты которых находятся внутри заданной площадки, имеют скорость, удовле-

творящую экспериментально полученному распределению скоростей, а плотность потока соответствует распределению плотности метеорного вещества по небесной сфере. Образуется метеорный след согласно физической модели [1]. Зондирующий сигнал, представляющий собой последовательность радиопульсов с прямоугольной огибающей, рассеивается метеорным следом, формируя сигнал, регистрируемый приемным устройством [1; 2]. Его огибающая называется амплитудно-временной характеристикой (АВХ). Затем производится измерение скорости по колебаниям АВХ [2; 3]. При этом делаются следующие предположения.

1. Формирование принимаемого сигнала происходит согласно зависимости

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \lambda^3 \alpha^2}{32\pi^2 R^3} \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 f^2(r_0) I^2, \quad (1)$$

где  $P_r$ ,  $P_t$  — мощности принимаемого и передаваемого сигналов;  $G_r$ ,  $G_t$  — коэффициенты усиления приемной и передающей антенн;  $\lambda$  — длина волны,  $\alpha$  — линейная электронная плотность следа;  $R$  — наклонная дальность от РЛС до точки зеркального отражения на следе;  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона;  $c$  — скорость света;

$$f(r_0) = e^{-\left(\frac{2\pi r_0}{\lambda}\right)^2}; \quad (2)$$

$r_0$  — начальный радиус следа;

$$I = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{-\left(\frac{2\pi r_0}{\lambda}\right)^2} e^{-\Delta(x_0-x)} dx \right|. \quad (3)$$

Мощность излучаемого сигнала

$$P_t = P_{cp} T/\tau. \quad (4)$$

2. Мощность помехи [4] на входе приемного устройства

$$P_n = k(T_a + T_r) \Delta F_{eq}, \quad (5)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/°С — постоянная Больцмана;  $T_a$ ,  $T_r$  — эквивалентные температуры шумов антенны и приемного устройства, °С;  $\Delta F_{eq}$  —

эквивалентная полоса пропускания, Гц. Дисперсия напряжения помехи, нормированной к сигналу,

$$\sigma_u^2 = P_n/P_r. \quad (6)$$

Помеха считается аддитивной, гауссовой, узкополосной.

### 3. Полоса пропускания приемника

$$\Delta F_{\text{opt}} = 1,37/\tau, \quad (7)$$

что соответствует условию квазиоптимальности по Сифорову.

Выделение сигнала из шума проводится в два этапа. На первом из них осуществляется поимпульсное выделение согласно критерию Неймана—Пирсона. Относительный порог  $h_0 = A_{\text{пор}}/\sigma$  для обнаружения одиночного импульса на фоне шума находится согласно выражению

$$h_0 = \sqrt{-2 \ln F}. \quad (8)$$

При вероятности ложной тревоги  $F = 0,1$  порог  $h_0 = 2,145$ , что соответствует вероятности правильного обнаружения  $D = 0,995$ .

На втором этапе производится обнаружение пачки (ABX) с помощью цифрового обнаружителя, используемого для защиты системы от ложных срабатываний. Он определяет начало импульсной последовательности по схеме «три из трех» и ее конец по трем пропускам. При заданной вероятности ложной тревоги  $F = 0,001$  обнаружитель обеспечивает вероятность правильного обнаружения  $D > 0,999$ . На этом заканчивается этап предварительной обработки. Далее выполняется первичная обработка.

Измеряется скорость метеорного тела по ABX [5]. Вначале последовательность импульсов сглаживается фильтром с астатизмом пятого порядка, реализованного в процедуре моделирования в виде скользящего среднего с весом [5]. Затем устанавливаются экстремумы ABX. Вначале в окрестности каждого из экстремумов берется пять точек и строится параболическая аппроксимация. Временное положение экстремума определяется как абсцисса экстремума полученной параболы. После этого по полученным экстремумам отыскивается скорость метеорного тела [2;3]:

$$V = L\sqrt{\lambda R}/(T2n), \quad (9)$$

где  $V$  — измеренная скорость;  $L$  — длина соответствующей зоны Френеля, выраженная в нормированных единицах (табличное значение) [2];  $\lambda$  — длина волны;  $R$  — наклонная дальность;  $T$  — период следования импульсов;  $n$  — число импульсов в зоне Френеля.

Все указанные действия повторяются для значений параметров метеорных тел (скорости  $V_{\infty}$ , азимута  $A$  и зенитного угла  $z$  радианта), сгенерированных согласно экспериментально найденным распределениям метеорных тел по скорости и координатам радианта. Усредненное значение квадрата отклонения измеренной скорости от заданной считается равным СКО измерения скорости комплексом МАРС. Данный эксперимент далее именуется экспериментом 1.

По результатам эксперимента 1 можно сделать следующие выводы. Во многих случаях погрешность измерения скорости по рассматриваемому алгоритму очень велика. В некоторых случаях оценка скорости не попала в интервал измеряемых скоростей (приблизительно 20...60 км/с) и была отброшена. При разных значениях параметров метеорных тел процент таких случаев различен и доходит до 20 % от общего количества измерений. Минимальное СКО измеряемой скорости составляет 2 км/с. Если это вызвано воздействием нерассматриваемых факторов (помех), то такой алгоритм измерения скорости нуждается в модификации.

Наиболее уязвимой частью алгоритма измерения скорости является процедура выбора точек в окрестности экстремумов. Рассматривая медленные метеоры, нужно выбирать больше точек для точного определения положения экстремума, поскольку экстремальные области плоские. Под действием помех координаты экстремумов могут значительно меняться. С другой стороны, для быстрых метеоров АВХ формируется за более короткое время, т.е. оказывается настолько сжатой, что, например, для скорости 60 км/с первый минимум в АВХ состоит из трех импульсов.

В связи с этим со времени создания комплекса МАРС предпринимались попытки усовершенствования алгоритма измерения скорости алгоритма. Прежде всего, на этапе от определения экстремумов до определения скорости проводилась многоканальная обработка. Использовалось три канала [34], где, например, дифференцировались: медленные метеоры с  $V_{app} \in [10...40]$ , средние с  $V_{app} \in [30...50]$ , быстрые с  $V_{app} \in [40...70]$ . Но тогда для выбора одного значения измеренной скорости из трех потребовалось вводить процедуру арбитража. Последняя сравнивает измеренные в трех каналах значения скорости с грубой оценкой скорости, предварительно полученной по максимальной зоне. Данный метод оказался сложным в реализации и обслуживании и не дал ожидаемого улучшения качества.

Следующей попыткой было использование аппроксимирующих сплайнов для описания АВХ, а затем определение экстремумов по сплайну [6]. Аппроксимирующий сплайн занимает промежуточное положение между интерполирующим сплайном и аппроксимацией по методу наименьших квадратов (МНК). Такой сплайн содержит параметр  $p_s \in [0...1]$ . При  $p_s=1$

имеет место интерполирующий сплайн, при  $p_s = 0$  — МНК-аппроксимация. В случае аппроксимации всей АВХ для всего диапазона скоростей  $p_s > 0,95$ . Если аппроксимировать только колебательную часть АВХ, т.е. отбросить пологий начальный участок, то оптимальные значения параметра лежат в интервале  $p_s \in [0,4 \dots 0,8]$  и существенно различаются для быстрых и медленных метеоров [7]. И в этом случае необходимы минимум три канала обработки и процедура арбитража.

Использование только экстремумов для определения скорости, по-видимому, связано с особенностями традиционной обработки, когда АВХ регистрировались на киноплёнку и обрабатывались вручную. В настоящее время использование, например, аппроксимирующих сплайнов позволяет описать всю АВХ, масштаб и форма которой определяются только двумя величинами — скоростью метеорного тела (которую и нужно определить) и наклонной дальностью до точки отражения (которая известна сразу после регистрации АВХ).

Фактически после выполнения предварительной обработки можно вводить сигнал в ЭВМ и решать задачу отыскания скорости программно. С помощью описанной математической модели генерируется АВХ с заданной скоростью метеорного тела. Затем две полученные АВХ (измеренная и моделируемая) сравниваются. Мерой расстояния между двумя функциями служит среднеквадратичное расстояние между значениями АВХ при одинаковых ее аргументах. Начальное значение скорости для моделирования задается из диапазона  $[10 \dots 72]$ , для расчета значения скорости на следующем шаге применяется алгоритм золотого сечения. Измеренным значением скорости считается такое значение, при котором расстояние между двумя АВХ (измеренной и моделируемой) минимально.

Подобно эксперименту 1 был выполнен эксперимент 2 — согласно алгоритму с изложенными выше изменениями. Результаты показывают высокое качество работы алгоритма (снижение погрешности по крайней мере на порядок, расширение диапазона измеряемых скоростей). При эксперименте 2 грубых ошибок измерения скорости (отказов) не было. Исследуемая СКО измеренной скорости  $\sigma_v$  принадлежит диапазону  $[0,3 \dots 1,2]$  во всем диапазоне скоростей.

Данный алгоритм позволяет измерять и вектор скорости. Для этого, дополнительно к измеренному значению модуля скорости, необходимо получить две временные задержки, по которым определяются направляющие косинусы вектора скорости [2; 3]. Одинаковым образом находятся три значения скорости — по АВХ, полученной в центральном и в двух выносных пунктах. После этого производится проверка

близости всех трех значений скорости. Что касается измерения задержек для определения направляющих косинусов скорости, то такая процедура после аппроксимации каждой из АВХ сплайном не является сложной.

**Список литературы:** 1. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере. Метеоры. Л.: Гидрометеорологический издат, 1980. 247 с. 2. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 3. *Дьяков А.А., Кащеев Б.Л.* Измерение скорости // *Астроном. вестн.* 1972. Т. 6, № 2. С. 118 — 125. 4. *Защита от радиопомех* / Под ред. М.В. Максимова. М.: Сов. радио, 1976. 496 с. 5. *Бор К. де.* Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 304 с. 6. *Кундюков С. Г., Назаренко Н.Б.* Применение сглаживающих сплайнов при обработке АВХ радиометеоров // *Метеор. исслед.* М., 1988. № 15. С. 103 — 108.

*Харьковский государственный технический  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.04.98*