

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Количество информации, передаваемой человечеством, неуклонно возрастает. И по-прежнему актуальна задача совершенствования существующих каналов передачи информации и получения новых каналов. Поэтому стоит вспомнить о незаслуженно забытом метеорном канале связи, который сочетает в себе следующие достоинства: полосу около 8 МГц, отсутствие "мертвой" зоны, затухание не более 160 дБ и дальность связи до 2500 км.

Недавно Международный союз коммуникаций (ITU) окончательно одобрил стандарт V.90, регламентирующий передачу данных по коммутируемым линиям со скоростью 56 кбит/с [1]. Полоса частот такого канала существенно меньше, чем у метеорного, — 3,1 кГц. При этом качество работы даже на местных коммутируемых линиях с использованием современных протоколов достаточно высокое и техническая скорость 33600 бит/с уже никого не удивляет. Исходя из перечисленного, можно утверждать, что возможности метеорного канала, несмотря на его прерывистость, далеко не исчерпаны.

Но для получения приемлемых характеристик канала необходимо иметь максимум информации о канале и эффективно его использовать. Прогнозировать параметры радиометеорного канала связи можно лишь тогда, когда известна плотность потока метеорных тел по небесной сфере [2].

Определение плотности потока метеорных тел по данным измерений представляет собой задачу интерпретации результатов измерений. В самом общем случае для ее решения нужно знать оператор прямой задачи радиолокации метеоров (по крайней мере, с точностью до вектора параметров) и уметь обратить его. Задача осложняется тем, что искомая плотность потока и оператор прямой задачи являются, строго говоря, неизвестными [2].

На процесс образования метеорного следа и формирования рассеянного им радиосигнала оказывает влияние множество факторов различной природы, которые принято объединять в группы. В данном случае целесообразно рассмотреть четыре групповых фактора:

1. **Астрономический ф.** Связан с вероятностью того, что орбита тела пересечет орбиту Земли, и обусловлен параметрами орбиты, скоростью, числом тел, движущихся по этой орбите, их распределением вдоль орбиты.

2. Физический φ_m . Определяется сложной зависимостью процесса образования следа от параметров тела (массы, плотности и скорости), высоты начала образования метеорного тела, вектора скорости Земли, параметров атмосферы на высоте образования следа.

3. Геометрический φ_c . Вызывается тем, что встреча тела с Землей происходит с разной вероятностью в различное время из-за того, что вектор скорости Земли постоянно меняет направление.

4. Аппаратурный φ_a . Его приходится учитывать при использовании любого средства измерения. В случае же использования радиотехнических средств этот фактор достаточно существен.

Воздействие факторов, приводящее к потере информации, показано на рис. 1, где отражено движение и преобразование информации в прямой задаче радиолокации.

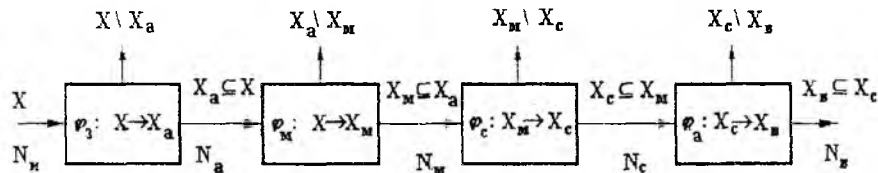


Рис. 1

Здесь множество X , содержащее N_n элементов, — объект исследования, а множество X_b содержит зарегистрированные элементы. Под воздействием каждого из факторов уменьшается число элементов множества X , которые доступны исследователю.

Математическое описание процессов движения метеорных тел и их взаимодействия с Землей как с объектом Солнечной системы, процессов взаимодействия метеорных тел с атмосферой, формирование рассеянного метеорным следом сигнала и его обработка радиотехнической системой и образуют функции "отбора" факторов. Имея аналитическое описание этих функций, можно получить вероятность регистрации элемента множества X с параметрами x_i :

$$P\{x_b\} = P\{x\} p_z p_m p_c p_a,$$

где p_z, p_m, p_c, p_a — вероятности выполнения условий, при которых измерение только и возможно при учете влияния каждого из факторов. Таким образом, влияние каждого из факторов описывается его функцией "отбора" φ_i и вероятностью p_i [2]. Полное аналитическое описание этих процессов

здесь не приведено ввиду его большого объема. Оператор прямой задачи можно обратить, идентифицировав каждый из факторов, т.е. определив φ_i и p_i [2].

При рассмотрении задачи интерпретации результатов измерений моделирование, по-видимому, является единственным приемлемым методом ее решения [2]. Стохастический характер исследуемых процессов делает точное моделирование излишним и позволяет использовать статистические методы как при моделировании, так и при обработке его результатов.

Интерпретация проводится путем построения и минимизации функционала

$$\lambda(\theta) = \sum [u_i - F(\varphi_i(\theta))]^2, \quad (1)$$

где θ — искомое решение (плотность потока метеорного вещества); F — оператор прямой задачи. В качестве экспериментального материала используются результаты измерения численности метеорных отражений как менее подверженные влиянию факторов.

Ввиду того что неизвестными (искомыми) являются как плотность потока метеорного вещества, так и интегральный фактор "отбора" (т.е. оператор F), моделирование выполняется в два этапа.

1. Моделирование системы регистрации численности согласно оператору прямой задачи и нахождение модельных численностей метеорных отражений, в предположении, что искомая плотность потока по небесной сфере равномерна. Это позволяет получить оценку интегрального фактора избирательности.

2. Подгонка модели. Ее смысл заключается в таком перераспределении плотности потока метеорного вещества, чтобы, с учетом полученной оценки интегрального фактора избирательности, найденная (модельная) численность метеорных отражений совпала с экспериментальной. Второй этап может быть реализован, например, если считать небесную сферу состоящей из равновеликих неперекрывающихся площадок, в каждой из которых плотность потока одинакова. В этом случае подгонка модели сводится к решению системы алгебраических линейных уравнений.

Для того чтобы построить распределение плотности потока метеорных тел с массой $M > 1$ мкг по гелиоцентрической небесной сфере, последняя разделяется на некоторое количество площадок, приблизительно равновеликих по значению телесного угла, и находится плотность потока метеорных частиц для каждой из них. При этом считается, что площадка попадает в область видимости, если видимым является ее центр. Под плотностью потока со всей сферы понимается количество тел с массами $M > 1$ мкг, пересекающих нормальную площадку с площадью 1 м^2 за 1 с , т.е. $Q[\text{м}^2 \text{с}^{-1} (4\pi \text{ ср})^{-1}]$ или для северной полусферы $Q[\text{м}^2 \text{с}^{-1} (2\pi \text{ ср})^{-1}]$.

В качестве исходных данных используется известная информация о состоянии комплекса метеорных тел [2].

Имитационное моделирование было выполнено с помощью усовершенствованного пакета прикладных подпрограмм, разработанного в Проблемной научно-исследовательской лаборатории радиотехники (ПНИЛ РТ) Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники для решения подобных задач. В пакете использована физическая модель образования метеорного следа, полученная В.Н. Лебединцом [3]. Данная модель более реалистично описывает происходящие в атмосфере процессы при образовании метеорного следа, учитывает торможение и дробление метеорного тела, его разогрев и деформацию. Моделирование может проводиться для метеорных тел различного состава (хондриты углестые, хондриты обыкновенные, каменные, комочки пыли). Выходными данными программы моделирования служили оценки интегральных факторов "отбора" для каждой из площадок на небесной сфере для 15-минутных интервалов.

После получения оценок интегрального фактора по небесной сфере выполнялась подгонка модели. Задача обработки и интерпретации результатов моделирования заключалась в таком перераспределении радиантов метеоров по небесной сфере, чтобы суточный ход модельных оценок "зарегистрированных" метеоров (тех, для которых модельные значения амплитуды отраженного сигнала превысили пороговый уровень регистрации приемного устройства) отвечал зарегистрированной численности в соответствующем интервале времени. Формально задача сводится к решению системы m линейных уравнений вида

$$N_j = \sum_{i=1}^n K_{ij} X_i, j = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где N_j — зарегистрированная численность метеоров в j -м интервале времени наблюдения; n — количество "больших" областей на небесной сфере, доступных наблюдению в j -м интервале времени; K_{ij} — оценки интегрального фактора, полученные при моделировании; X_i — плотность потока метеорных тел из i -й площадки на небесной сфере. Такая система называется плохо обусловленной и может быть решена только приближенно. Если учесть, что N_j и K_{ij} определяются с существенными погрешностями, а система (2) — плохо обусловленная, то задачу решения данной системы следует отнести, по Адамару, к классу некорректно поставленных задач, а значит, решение не единственно и неустойчиво [4].

В решаемой системе линейных алгебраических уравнений коэффициенты, свободные члены и искомые результаты — положительные числа. Если число

площадок $n = 400$, а число уравнений $m = 96$ (круглосуточные наблюдения, интервал наблюдений равен 15 мин), то система является переопределенной и имеет бесконечно большое множество решений. В таком виде решаемая задача является задачей линейного программирования в случае, если соответствующий функционал линеен [5].

Область допустимых решений (2) в широком смысле определяется как множество всех X с положительными членами, удовлетворяющих (2). В качестве функционала, минимизация которого приводит к выбору решения из множества допустимых решений, можно выбрать функционал, определяющий степень гладкости возможного решения.

Для решения системы (2) было рассмотрено несколько методов.

Итерационный метод, предложенный в работе Ю.А. Пупышева и Л.Б. Шевченко, прост и логически понятен [6]. В нем используется тот факт, что коэффициенты, свободные члены и неизвестные — положительные числа. Достоинствами данного метода являются его простота и невозможность получения отрицательных решений, поскольку операции вычитания отсутствуют. К недостаткам метода необходимо отнести тот факт, что при достаточно широком множестве допустимых решений получаемое решение является приближенным. Показать аналитически сходимость, а

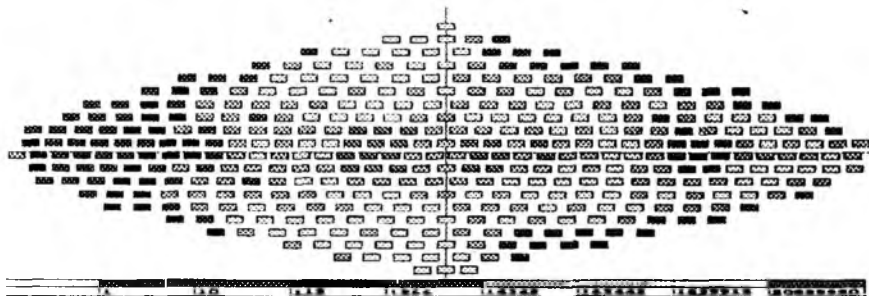


Рис. 2

также ее равномерность авторам метода не удалось.

Из методов решения задачи линейного программирования следует сразу же исключить методы полного перебора из-за невозможности решения задачи с помощью вычислительной техники настоящего времени и недалекого будущего за сколько-нибудь приемлемый интервал времени (число перебора равно R^{229-96} , где R — число уровней для каждой неизвестной). По этой же причине, а также по причине получения отрицательных решений, не удалось решить систему (2) методами псевдообращения, секущих плоскостей, последовательного улучшения и симплекс-методом.

Поэтому нами использовался метод Ю.А. Пупышева и Л.Б. Шевченко [6]. Результаты моделирования, т.е. полученные оценки плотности потока метеорных тел, показаны на рис. 2. Они использованы для составления прогноза трассы метеорной радиосвязи. Так, зная координаты пунктов на местности и имея модель распределения плотности потока метеорного вещества по небесной сфере, можно составить прогноз параметров метеорного канала связи. На рис. 3 дан прогноз суточного хода коэффициента заполнения.

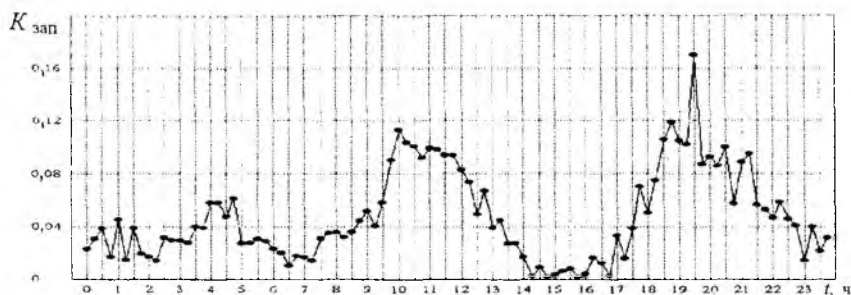


Рис 3

К достоинствам разработанной имитационной модели относятся: учет влияния всех факторов наблюдения (в рамках выбранной модели); использование при ее получении данных о регистрации численности, менее подверженных влиянию факторов наблюдения, чем данные измерения координат радиантов и параметров орбит. Описанная модель может служить достаточно надежным средством для обработки распределений экспериментально измеренных координат радиантов, прогнозирования трасс метеорного распространения радиоволн, оценки коэффициента заполнения, требуемых параметров аппаратуры систем передачи информации.

Список литературы: 1. *Новости* // Hard 'n' Soft M., 1998. № 10. С. 7. 2. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. К: Наук. думка, 1989. 296 с. 3. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере. Метеоры. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 247 с. 4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с. 5. *Турчак Л.И.* Основы численных методов. М.: Наука, 1987. 320 с. 6. *Пупышев Ю.А., Шевченко Л.Б.* Решение системы условных алгебраических уравнений высокого порядка, в которых коэффициенты, свободные члены и неизвестные — положительные числа // Метеор. распространение радиоволн. Казань, 1970. Вып. 7. С. 21 — 32.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 18.09.98