

*Альошинський Євген Семенович, доктор технічних наук, професор, кафедра транспортних систем та логістики, Українська державна академія залізничного транспорту, Україна.*

*Світлична Софія Олександрівна, аспірант, кафедра транспортних систем та логістики, Українська державна академія залізничного транспорту, Україна, e-mail: sofya.svetlichnaya@mail.ru.*

*Виборнова Юлія Юрійівна, кафедра транспортних систем та логістики, Українська державна академія залізничного транспорту, Україна.*

*Алешиинский Евгений Семенович, доктор технических наук, профессор, кафедра транспортных систем и логистики, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.*

*Светличная София Александровна, аспирант, кафедра транспортных систем и логистики, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.*

*Выборнова Юлия Юрьевна, кафедра транспортных систем и логистики, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.*

*Alyoshynsky Eugene, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine.*

*Svitlichna Sofiya, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine, e-mail: sofya.svetlichnaya@mail.ru.*

*Vybornova Yuliya, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine*

УДК 621.396.96

**Антипов И. Е.,  
Бондарь Е. Ю.,  
Шкарлет А. И.**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОРНОЙ РЛС С ЦЕЛЮ ОПТИМИЗАЦИИ ЕЕ РАБОТЫ

*В статье предложена структура модели, которая включает в себя как параметры наземной исследовательской аппаратуры Метеорной Автоматизированной Радиолокационной Системы, так и модель метеорного радиоотражения. Рассмотренная модель реализована в виде компьютерной программы. От существующих она отличается учетом изменения амплитуды сигнала в процессе формирования следа и возможностью моделирования метеорного распространения радиоволн на «сверхкороткие» трассы.*

**Ключевые слова:** метеорный след, модель метеорного радиоотражения

### 1. Введение

С 50-х годов прошлого века в Харькове начались метеорные наблюдения с помощью радиолокационных станций, а с 1966 наблюдения продолжались с использованием специально созданной для этих целей Метеорной Автоматизированной Радиолокационной Системы (МАРС) [1].

МАРС обладает значительным энергетическим потенциалом и высокой чувствительностью, что позволило в ходе многолетних непрерывных наблюдений получить уникальные научные результаты, на основе которых был создан каталог метеорных орбит. В состав комплекса МАРС входит также автоматический угломер, позволяющий исследовать ветры в верхней атмосфере. Работы в этом направлении проводились с 1975, в том числе, по международным программам, одной из последних была программа INTAS (1998–1999 гг.).

Во время включения в 2006 году изучалась возможность сверхдальнего метеорного распространения радиоволн [2, 3].

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Следует признать, что, будучи созданным около 50 лет назад, комплекс МАРС в некоторой мере устарел. Следует выделить:

— несовершенную с современной точки зрения систему регистрации. В 60–70 годы регистрация осу-

ществлялась на фотопленку с последующей ручной обработкой. Из-за того, что автоматизация процесса была достаточно затруднена, часть материалов до сих пор не обработана [4];

— низкий КПД передатчика и, как следствие, значительная потребляемая мощность делают регулярную эксплуатацию комплекса достаточно дорогостоящей;

— недостаточная электромагнитная совместимость с возникшими в последние десятилетия аппаратурой связи и телевидения приводит к взаимным помехам;

— из-за относительно низкой рабочей частоты (27 МГц, а затем 31,1 МГц) в летние месяцы имеют место помехи, вызванные отражениями от ионосферы (т. н. ВНЗ [5]);

— устаревшая элементная база затрудняет ремонт и обслуживание аппаратуры.

### 3. Цель и задачи исследования

Необходимость продолжать метеорные исследования с одной стороны, и невозможность делать это на существующем оборудовании, с другой приводят к необходимости модернизации комплекса с учетом новых задач и новых возможностей.

Но простой переход на новую элементную базу без учета изменившихся условий работы и новых задач исследования нецелесообразен. Необходимо пересмотреть ряд параметров существующей аппаратуры (рабочая частота, форма и длительность импульса, период повторения, размещение выносных пунктов, порядок

регистрации и т. д.) Учет большого числа факторов можно осуществить путем моделирования работы обновленного комплекса. Но такое моделирование невозможно осуществить без самой главной составляющей — модели метеорного радиоотражения. Поэтому актуальной является задача разработки модели, которая включала бы в себя как параметры наземной исследовательской аппаратуры, так и модель процессов, происходящих в метеорной зоне. Разработке такой модели и посвящена данная статья.

#### 4. Описание модели метеорного радиоотражения

После анализа нескольких моделей, подробно рассмотренных в [2, 3, 6, 7], можно предложить обобщенную структурную схему новой модели, которая графически представлена на рис. 1. Ее процедуры условно можно разделить на два этапа. Рассмотрим эти этапы и их основные составные части.



Рис. 1. Структурная схема модели метеорного радиоотражения

На первом этапе на основании имеющейся информации о географических координатах метеорной РЛС, для заданных даты и времени суток осуществляется моделирование метеорных частиц с известным распределением масс. Количество частиц с массами от  $M$  до  $M + dM$  за время  $dt$  подчиняется зависимости

$$dN = Q_0 M^{-s} dM dt d\sigma, \quad (1)$$

где  $Q_0$  — активность радианта (метеоров в час);  $d\sigma$  — величина площадки на небесной сфере (стерадиан);  $s$  — параметр распределения масс, который считаем равным 2,23 [3].

Активность радианта  $Q_0$  определяется с использованием астрономической базы модели, которая представляет собой таблицу распределения метеорных радиантов по небесной сфере и по скоростям для разных месяцев года. Эти данные были получены путем обработки результатов метеорных наблюдений на том же комплексе МАРС в 70-е годы.

Процедуры преобразования координат включают в себя несколько этапов. Во-первых, осуществляется пересчет координат радиантов метеорных частиц из гелиоцентрических координат (которые имеются в базе) в геоцентрические, связанные с движущейся Землей. При этом учитывается орбитальная скорость Земли и ее положение на орбите (определяется днем года). Во-вторых, геоцентрические координаты преобразуются в экваториальные, связанные с условно неподвижной Землей. И, в третьих, экваториальные координаты преобразуются в горизонтальные, связанные с географическим положением метеорной РЛС и временем суток. Формулы для преобразования можно найти в [8], а их практическое использование для метеорного моделирования в [3].

Проверка условия касания предполагает решение системы уравнений,

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2; \\ \frac{x - x_M}{m} = \frac{y - y_M}{n} = \frac{z - z_M}{p}. \end{cases} \quad (2)$$

Первое уравнение системы — уравнение сферы с центром в точке расположения метеорной РЛС с координатами  $(0, 0, 0)$ , (рис. 2); второе — уравнение прямой, вдоль которой движется метеорная частица. Ее ориентация задается направляющими косинусами радианта  $m, n, p$ . Если у системы имеется единственное решение, это означает, что имеет место касание метеорного следа и сферы. Следовательно, условие отражения выполняется и найденные переменные и есть координаты отражающей точки. В случае, если решений два, это означает, что метеор «протыкает» сферу и условие отражения не выполняется. Сложность решения состоит в том, что радиус сферы  $R$  заранее неизвестен, он может меняться в таких пределах, чтобы высота отражающей точки оставалась в пределах метеорной зоны (78...105 км).

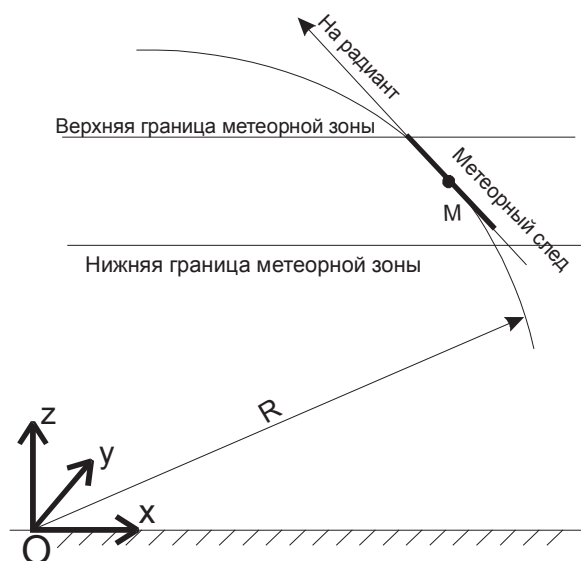


Рис. 2. Геометрия отражения

По итогам первого этапа моделирования формируются промежуточные результаты, которые для каждой из смоделированных метеорных частиц, прошедших проверку на условие касания, содержат три координаты

отражающей точки, электронную плотность в ней, постоянную времени рассеяния следа и вектор скорости частицы. Последний параметр является отличительной особенностью данной модели. В ранее рассмотренных моделях (например, в [3]) вектор скорости частицы не рассчитывался.

Промежуточные результаты сохраняются в виде отдельного файла, который будет использоваться на втором этапе. Графическая интерпретация промежуточных данных представлена на рис. 3.

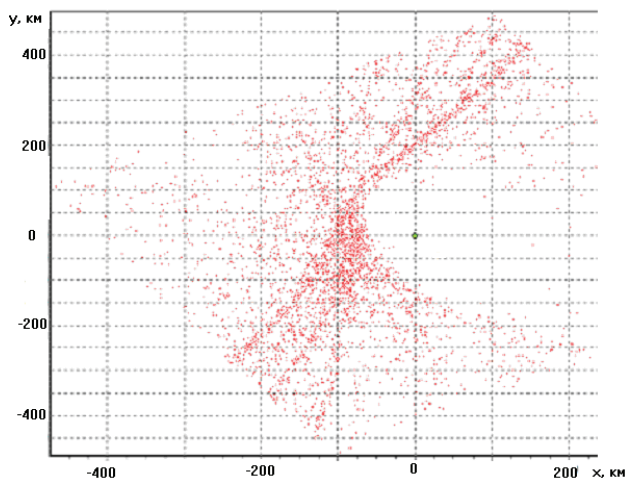


Рис. 3. Графическое представление промежуточных результатов моделирования

Здесь каждой точке на плоскости соответствует сохраненные значения параметров частицы.

На втором этапе моделирования для существующих или для предполагаемых параметров РЛС (мощность сигнала, отношение сигнал/шум, длительность отражения, форма и ориентация диаграмм направленности приемной и передающей антенн) определяется мощность и длительность отражения. При этом в качестве модели отражения радиоволн от ненасыщенного следа можно использовать известное [9] выражение

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \alpha^2 \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f^2(r_0) \phi^2(\Delta)}{32\pi^2} \quad (3)$$

где  $P_{\text{пер}}$  — импульсная мощность передатчика;  $G_{\text{пер}}$ ,  $G_{\text{пр}}$  — коэффициент направленного действия передающей и приемной антенн;  $\alpha$  — линейная электронная плотность в следе;  $\lambda$  — длина волны;  $R$  — дальность до следа;  $m$ ,  $e$  — масса и заряд электрона;  $c$  — скорость света;  $r_0$  — начальный радиус следа, а  $\Delta$  представляет собой функцию

$$\Delta = \frac{8\pi^2 D \sqrt{R}}{V \lambda^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

где  $D$  — коэффициент амбиполярной диффузии;  $V$  — модуль скорости метеора. Множители  $f(r_0) = e^{-\left(\frac{2\pi}{\lambda} r_0\right)^2}$  и  $\phi(\Delta) = \frac{1 - e^{-\sqrt{2}\Delta}}{\sqrt{2}\Delta}$  учитывают ослабление сигнала вследствие влияния начального радиуса следа и диффузного расширения за время формирования первой зоны Френеля.

Для насыщенного следа используется модель [9]

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \alpha^2 \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f(r_0) \phi^2(\Delta)}{32\pi^2} \quad (5)$$

Возможность определить радиолокационным методом скорость частицы связана с измерением длин зон Френеля [10]. Для их моделирования наряду с координатами отражающей точки и электронной плотности следа в ней, необходима информация о векторе скорости частицы. Эта скорость используется при преобразовании координат и при расчете электронной плотности. Определение трех составляющих скорости может быть выполнено как

$$V_x = V_{\infty} \cos\left(\arctan \frac{m}{n} - \eta\right); \quad (6)$$

$$V_y = V_{\infty} \sin\left(\arctan \frac{m}{n} - \eta\right); \quad (7)$$

$$V_z = V_{\infty} p; \quad (8)$$

где  $V_{\infty}$  — внеатмосферная скорость частицы,  $\eta$  — угол между направлением на север и осью трассы. С целью повышения наглядности при отображении результатов моделирования направление осей  $x$  и  $y$  выбрано на север и на восток, соответственно.

На рис. 4 приведены экстремумы дифракционной картины. Скорость получают по интерференционным колебаниям АВХ с помощью формулы

$$V_{\text{из}} = \frac{L_{BD} F \sqrt{\lambda R}}{2n}, \quad (9)$$

где  $V_{\text{из}}$  — измеренная скорость,  $L_{BD}$  — длина соответствующей зоны Френеля, выраженная в нормированных единицах, (рис. 4),  $F$  — частота следования импульсов,  $n$  — число импульсов в зоне  $BD$  [9].

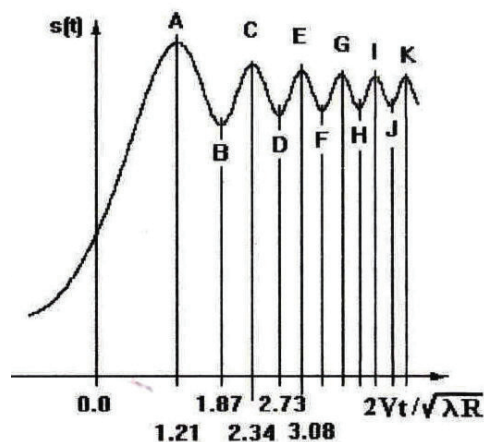


Рис. 4. Экстремумы дифракционной картины

Для выбора расстояний  $d$  между выносными пунктами (рис. 5) можно использовать варианты формул (1) и (2) для случая радиосвязи. При метеорной связи расстояние вовсе не обязательно должно составлять сотни или тысячи километров. Данные формулы адекватно отображают ситуацию и в условиях коротких трасс, что показано в работе [3].

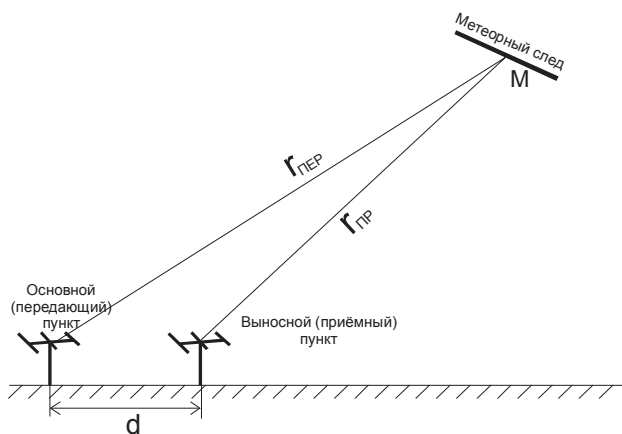


Рис. 5. Размещение выносного пункта

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \sigma \lambda_w^3 \alpha^2 \cos^2 \mu \exp\left(-\frac{8\pi r_0}{\lambda_w \sec^2 \theta}\right)}{(4\pi)^3 r_{пер} r_{пр} (r_{пер} + r_{пр}) (1 + \sin^2 \theta \cos^2 \gamma)}, \quad (10)$$

где  $m$  — угол между вектором электрического поля падающей волны и осью следа;  $\theta$  — угол падения передаваемой волны на след;  $\gamma$  — угол между метеорным следом и плоскостью, проведенной через пункты передачи, приема и отражающую точку метеорного следа  $M_0$ ;  $r_{пер}$  и  $r_{пр}$  — расстояния между передающей антенной и отражающей областью и приемной антенной и отражающей областью;  $r_0$  — начальный радиус метеорного следа;  $s$  — эффективная поверхность рассеяния электрона ( $10^{-28} \text{ м}^2$ ). Для насыщенного следа (если электронная плотность больше, чем  $2,4 \cdot 10^{15} \text{ эл/м}$ ) зависимость имеет вид:

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \sigma \lambda_w^2 \sqrt{\frac{\gamma_0^2}{\sec^2 \theta} \ln\left(\frac{r_e \alpha \lambda_w^2 \sec^2 \theta}{\pi^2 r_0^2}\right)}}{32\pi^2 r_{пер} r_{пр} (r_{пер} + r_{пр}) (1 + \sin^2 \theta \cos^2 \gamma)}, \quad (11)$$

где  $r_e = 3 \cdot 10^{-15} \text{ м}$  — классический радиус электрона.

### 5. Выводы

Итак, рассмотренная модель реализована в виде компьютерной программы. Ее основные преимущества: — в модели учитывается изменение амплитуды сигнала в процессе формирования следа (АВХ); — предусмотрена возможность моделирования РРВ на «сверхкороткие» трассы — между основным и выносными пунктами; — предусмотрена возможность определения координат следа, что необходимо для последующего определения метеорного радианта.

Таким образом, в работе представлено описание новой модели, которая позволит рассматривать различные варианты построения обновленного метеорной радиолокационной системы.

### Литература

1. Антипов, И. Е. Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований [Текст] / И. Е. Антипов, А. А. Костыря, И. А. Шкарлет // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. — 2010 — Вып. 160. — С. 39–46.

2. Антипов, И. Е. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации [Текст] : дисс... докт. техн. наук. / И. Е. Антипов. — Харьков, 2007. — 306 с.

3. Антипов, И. Е. Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс [Текст] : дисс... канд. техн. наук / И. Е. Антипов. — Харьков, 1996. — 144 с.

4. Антипов, И. Е. Автоматизированный алгоритм распознавания и анализа метеорных АВХ [Текст] / И. Е. Антипов, Е. Ю. Бондарь, Н. О. Сорох, О. А. Соляник // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. — 2011. — Вып. 165. — С. 56–62.

5. Антипов, И. Е. Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации [Текст] / И. Е. Антипов, А. А. Костыря, И. А. Шкарлет // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. — 2012. — Вып. 169. — С. 55–59.

6. Мак-Кинли, Э. Методы метеорной астрономии [Текст] / Э. Мак-Кинли. — М.: Мир, 1964. — 384 с.

7. Костылев, К. В. Астрономические основы метеорной радиосвязи [Текст] / К. В. Костылев. — Казань. Изд-во КГУ, 1970. — 142 с.

8. Астапович, И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли [Текст] / И. С. Астапович. — Государственное издательство физико-математической литературы. — М., 1958. — 640 с.

9. Кашеев, Б. Л. Метеорные явления в атмосфере Земли [Текст] / Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. — М.: Изд-во «Наука», 1967. — 260 с.

10. Антипов, И. Е. Восстановление координат метеорного радианта по неполной радиолокационной информации [Текст] / И. Е. Антипов, Н. О. Сорох, Р. В. Шандренко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. — 2012. — Вып. 169. — С. 11–15.

### МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТЕОРНОЇ РЛС З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇЇ РОБОТИ

У статті запропонована структура моделі, яка включає в себе як параметри наземної дослідницької апаратури Метеорної Автоматизованої Радиолокаційної Системи, так і модель метеорного радіовідбиття. Розглянута модель реалізована у вигляді комп'ютерної програми. Від існуючих вона відрізняється урахуванням зміни амплітуди сигналу в процесі формування сліду і можливістю моделювання метеорного поширення радіохвилі на «надкороткі» траси.

**Ключові слова:** метеорний слід, модель метеорного радіовідбиття.

*Антипов Іван Євгенєвич, доктор технічних наук, професор, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: i\_ant@mail.ru.*

*Бондарь Євгенія Юрьєвна, кандидат технічних наук, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: gxaski@yandex.ru.*

*Шкарлет Олександр Іванович, аспірант, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: adretta59@mail.ru.*

*Антипов Іван Євгенєвич, доктор технічних наук, професор, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.*

*Бондар Євгенія Юрьєвна, кандидат технічних наук, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.*

*Шкарлет Олександр Іванович, аспірант, кафедра радіоелектронних пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.*

*Shkarlet Aleksandra, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: adretta59@mail.ru.*

*Antipov Ivan, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: i\_ant@mail.ru.*

*Bondar Evgeniya, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: gxaski@yandex.ru*