

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОРНОЙ РЛС С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ЕЕ РАБОТЫ

Метеорные наблюдения с помощью радиолокационных станций в Харькове начались с 50-х годов XX века, а с 1966 г. 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 г. изучалась возможность сверхдальнего метеорного распространения радиоволн [2].

Но, 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-е годы регистрация осуществлялась 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. возвратно-наклонное зондирование (ВНЗ) [5].)

- устаревшая элементная база затрудняет ремонт и обслуживание аппаратуры.

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.

Однако 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.

После анализа нескольких моделей, подробно рассмотренных в [2, 3, 8], можно предложить обобщенную структурную схему новой модели, которая 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

Активность радианта Q_0 определяется с помощью 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 [6], 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).

По итогам первого этапа моделирования формируются промежуточные результаты, которые для каждой из смоделированных метеорных частиц, прошедших проверку на

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].

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.

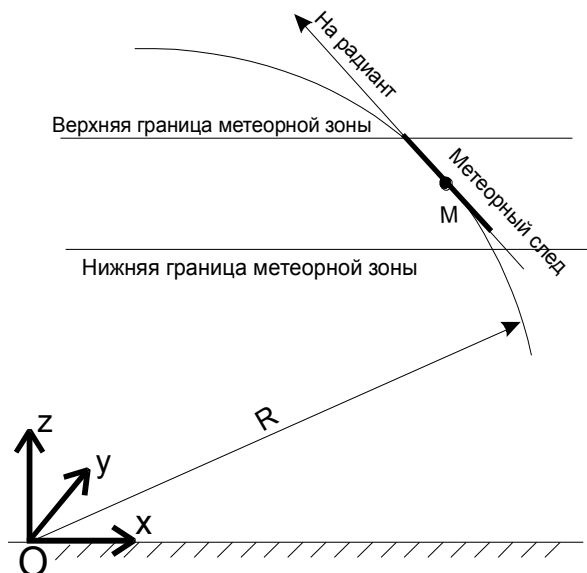


Рис.2. Геометрия отражения

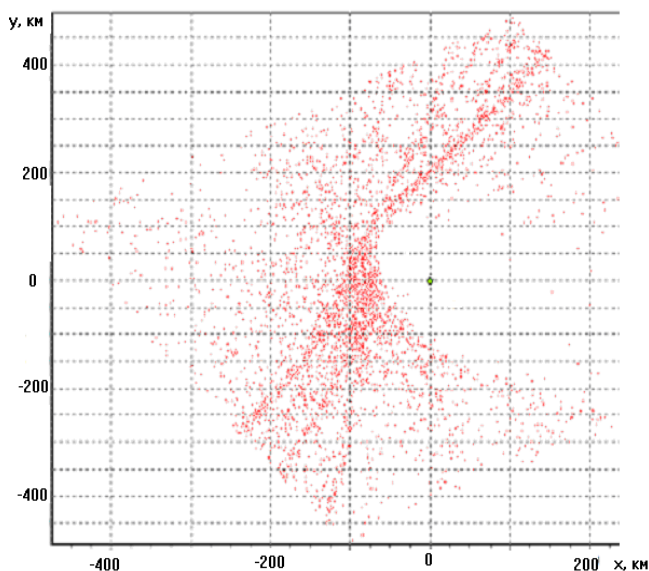


Рис.3. Графическое представление промежуточных результатов моделирования

Здесь каждой точке на плоскости соответствуют 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 [7] выражение

$$D_{i\delta} = \frac{D_{i\delta\delta} G_{i\delta\delta} G_{i\delta} \alpha^2}{32\pi^2} \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f^2(r_0) \varphi^2(\Delta), \quad (3)$$

где $P_{пер}$ – импульсная мощность передатчика; $G_{пер}$, $G_{пр}$ – коэффициент направленного действия передающей и приемной антенн; α – линейная электронная плотность в следе; λ – длина волны; R – дальность до следа; m , e – масса и заряд электрона; c – скорость света; r_0 – начальный радиус следа, а Δ 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 $\varphi(\Delta) = \frac{1 - e^{-\sqrt{2}\Delta}}{\sqrt{2\Delta}}$ учитывают ослабление сигнала вследствие влияния начального радиуса следа и диффузного расширения за время формирования первой зоны Френеля. Для насыщенного следа используется модель [7]

$$D_{i\delta} = \frac{D_{i\delta\delta} G_{i\delta\delta} G_{i\delta} \alpha^2}{32\pi^2} \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f(r_0) \varphi^2(\Delta). \quad (5)$$

Возможность определить радиолокационным методом скорость частицы связана с измерением длин зон Френеля [9]. 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

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

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

$$V_z = V_\infty p, \quad (8)$$

где V_∞ – внеатмосферная скорость частицы, η – 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

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

где $V_{из}$ – измеренная скорость, L_{BD} – длина соответствующей зоны Френеля, выраженная в нормированных единицах, (рис. 4), F – частота следования импульсов, n – число импульсов в зоне ВД. [7]

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]:

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

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

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

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

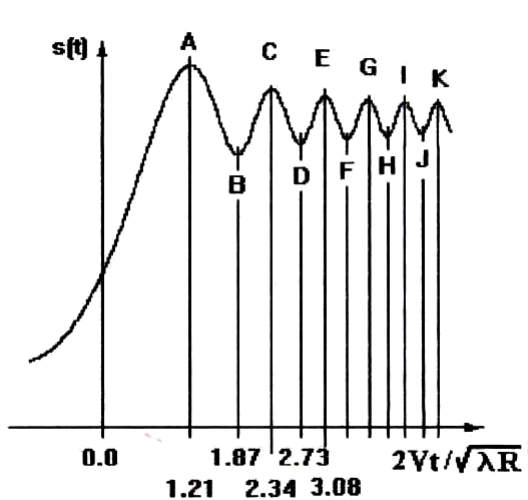


Рис. 4. Экстремумы дифракционной картины

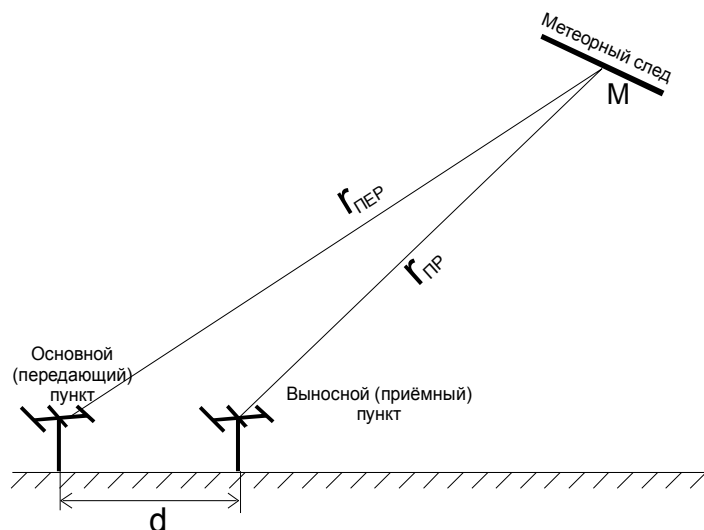


Рис.5. Размещение выносного пункта

Результаты предварительного моделирования

Как видно из представленного выше описания модели, она является многофакторной. Это соответствует многофакторности проектирования самой метеорной РЛС – однозначно указать, какие именно параметры следует анализировать и изменять невозможно. Поэтому первоначально было осуществлено предварительное моделирование изменения следующих параметров:

- рабочая частота,
- ширина и форма ДН антенн;
- расстояния до выносных пунктов;
- длительность и период следования зондирующих импульсов,

а также оценена возможность использования сложных сигналов.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

Рабочая частота будущего обновленного метеорного радиолокационного комплекса должна находиться в пределах 25 – 50 МГц. Не исключено, что при более детальном моделировании окажется, что наиболее рационально будет несколько повысить рабочую частоту по сравнению с используемой в настоящее время (31,5 МГц), чтобы избежать влияния ионосферы, которое проявляется в виде сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ).

Предварительные результаты показывают, что расстояния до выносных пунктов должны оставаться в пределах 5 – 10 км. Уменьшение приводит к сокращению базы и росту погрешности, а при увеличении расстояния уменьшается вероятность того, что все выносные пункты смогут принять отраженный сигнал.

Как видно, эти два параметра не должны существенно отличаться от используемых в настоящее время.

Что касается формы ДН, то имеет смысл рассмотреть возможность сделать ее более узкой ($5 - 10^\circ$), а для того, чтобы не уменьшать размеры зоны локации, предусмотреть ее поворот в угломестной плоскости на $30 - 60^\circ$. Поворот необходимо осуществлять достаточно быстро, поэтому реализовать его лучше следует путем применения фазированной антенной решетки (ФАР).

Также анализировалась длительность и период следования зондирующих импульсов радиолокатора. Период следования определяет наклонную дальность, которая однозначно определяется. Имеющийся период следования – 2 мс.

Длительность импульса в 30 мкс может быть уменьшена при сохранении мощности передатчика. Полоса частот метеорного радиоканала (которая составляет несколько ме-

гагерц) позволит получать неискаженные отражения в случае укорочения импульсов до нескольких микросекунд.

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 и сделаны предварительные оценки пределов, в которых следует искать наиболее рациональные значения моделируемых параметров.

Список литературы: 1. *Антипов И. Е., Костыря А. А., Шкарлет И. А.* Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований // Радиотехника. – 2010. – Вып. 160. – С. 39-46. 2. *Антипов И. Е.*, Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации : дис. ... д-ра техн. наук. – 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 : дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1996. – 144 с. 4. *Набиль Оде Имнехир.* Автоматизированный алгоритм распознавания и анализа метеорных АВХ / Антипов И. Е., Бондарь Е. Ю., Сорох Н. О., Соляник О. А. // Радиотехника. – 2011. – Вып. 165. – С. 56 – 62. 5. *Антипов И. Е., Костыря А. А., Шкарлет А.И.* Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С. 55 – 59. 6. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. Государственное издательство физико-математической литературы. – М. : 1958. – 640 с. 7. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. – М. : Наука, 1967. – 260 с. 8. *Мак-Кинли Э.* Методы метеорной астрономии. – М. : Мир, 1964. – 384 с. 9. *Антипов И. Е.* Восстановление координат метеорного радианта по неполной радиолокационной информации / Антипов И. Е., Набиль Оде Имнехир, Шандренко Р. В. // Радиотехника. – 2012 – Вып. 169. С. 11 – 15.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 22.06.2013