

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРНОГО РАДИОКАНАЛА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЛОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

### Постановка задачи

Задача использования метеорного радиоканала (МРК) для формирования числовых случайных последовательностей (ЧСП) рассмотрена в работах [1 – 4]. Отмечается, что метеорный радиоканал является естественным генератором случайных чисел, причём, благодаря зеркальному характеру отражения радиоволн, получение этих случайных чисел возможно лишь в пунктах размещения корреспондентов, связанных между собой по данному МРК.

В [1] указывается, что МРК с его многочисленными случайными характеристиками можно представить как случайный природный процесс, наблюдаемый одновременно из двух пунктов. При этом случайными являются:

- момент возникновения радиоотражения;
- длительность радиоотражения;
- интервал между радиоотражениями;
- время распространения сигнала по трассе;
- местоположение следа в пространстве;
- форма амплитудно-временной характеристики.

Каждая из этих характеристик в отдельности или их совокупность может быть использована для формирования ЧСП. Далее в [1] подробно рассматривается возможность использования случайных координат метеорного следа для формирования ЧСП. Численно производительность способа оценивается в 14–17 бит на один метеорный след.

В [2] ЧСП предлагается формировать с использованием времени распространения сигнала по трассе. Для его точного измерения оба пункта предлагается оснастить высокостабильными хранителями времени. Как считают авторы [2], производительность такого способа может быть оценена в 350 бит в час (при 17–19 бит на каждом метеорном следе.) В [3] заявляется способ формирования ЧСП с использованием случайных координат следа. Приводится структурная схема устройства, реализующего этот способ, и ожидаемые характеристики ЧСП. В [4] приводятся экспериментальные данные о формировании ЧСП с использованием информации о временном интервале между метеорными следами. В качестве основы для расчёта использованы полученные ранее экспериментальные данные.

К сожалению, не все теоретические предположения в настоящее время могут быть проверены экспериментально. Для выбора наиболее перспективного направления дальнейших исследований и оценки ожидаемых результатов может быть применено математическое моделирование случайных характеристик МРК.

Таким образом, целью данной работы является разработка модели МРК, ориентированной на расчёт его случайных характеристик, которые перечислены выше.

### Обзор и анализ известных моделей МРК

Моделированию МРК посвящено множество работ, один только их обзор может быть темой целой статьи. Достаточно полный такой обзор представлен в [5].

Структуру модели метеорного радиоканала можно представить состоящей из нескольких основных компонентов: 1) астрономическая модель притока метеорного вещества на Землю; 2) методика геометрического отбора; 3) физическая модель образования следа; 4) математическая модель приемопередающей станции и энергетической селекции.

Во всех рассмотренных в [5] моделях разработчиков интересуют статические характеристики метеорного канала связи или синхронизации, а именно: средняя длительность отражения, среднее время ожидания, суточные и сезонные изменения этих параметров, а также области

преобладания «полезных» следов в то или иное время суток. В конечном счёте, модели разрабатывались для оценки средней пропускной способности метеорного радиоканала. Индивидуальные характеристики каждого следа, практически, никого не интересовали. В рассматриваемой же задаче результатом моделирования должны стать именно индивидуальные характеристики каждого отдельного следа, поскольку они являются материалом для формирования ЧСП.

В качестве основы для моделирования в нашей работе возьмём модель МРК, разработанную в [5]. (Её краткое описание представлено также в [6]). Это целесообразно сделать по следующим причинам:

- во-первых, в качестве физической базы модели [5] используется реальное распределение метеорных радиантов по небесной сфере. Оно было получено путём обработки результатов многолетних наблюдений на комплексе МАРС в 1970-е годы;
- во-вторых, задача, для которой разрабатывалась данная модель (расчёт ориентации ДН антенн в условиях коротких трасс), наиболее близка к поставленной. В алгоритм работы этой модели включён расчёт пространственного положения отражающей точки.;
- в третьих, авторам данной статьи доступно подробное описание, программный код и астрономическая база модели [5].

### Модель для расчёта случайных характеристик метеорных следов

В рамках данной статьи мы не будем повторять описание существующей модели [5]. Остановимся лишь на тех особенностях, изменениях и дополнениях, которые потребуется внести в модель для решения поставленной задачи.

Астрономическую часть модели необходимо дополнить учётом разницы во времени, т.к. модель [5] разрабатывалась исключительно для коротких трасс. Если трасса, для которой осуществляется моделирование, вытянута в широтном направлении, то для расчёта астрономических параметров модели следует использовать время середины трассы. (Для трасс, вытянутых по меридиану, а также для трасс короче 400 км с приемлемой погрешностью можно использовать местное время одного из пунктов.) В остальном астрономическая часть модели не требует изменений.

На этапе преобразования координат необходимо учесть сферичность Земли. При выборе системы с началом отсчёта в середине трассы (рис. 1) максимальное возвышение поверхности Земли над прямой, соединяющей точки T и R составит

$$\Delta h_{\max} = \sqrt{(L/2)^2 - \left( R_{\oplus} \sin\left(\frac{L}{2R_{\oplus}}\right) \right)^2}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина трассы,  $R_{\oplus} = 6370$  км (радиус Земли).

Для произвольной точки  $M_0$  с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  возвышение может быть найдено как

$$\Delta h = \sqrt{\left(\frac{L}{2} - |x_0|L\right)^2 - \left( R_{\oplus} \sin\left(\frac{L}{2R_{\oplus}}\right) \right)^2}. \quad (2)$$

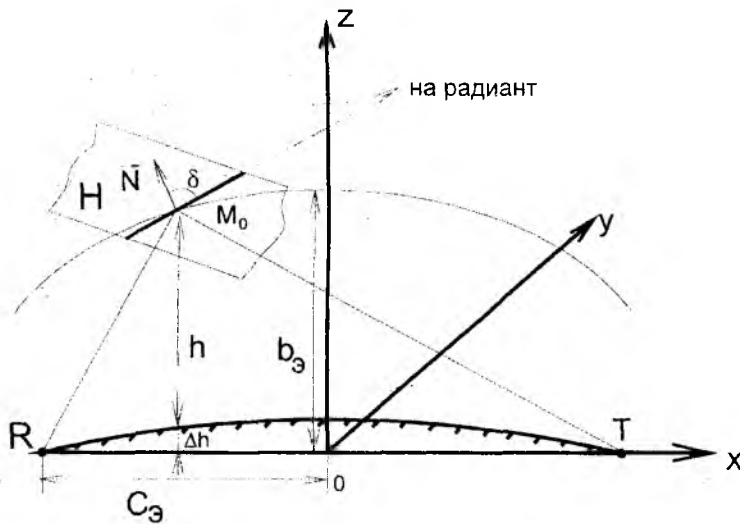
Смещением вдоль оси  $y$  в первом приближении можно пренебречь. Для коротких трасс поправка будет несущественной, а для длинных большая величина отклонения величины  $y$  от нуля маловероятна, т. к. полезные для связи метеорные следы возникают вблизи оси трассы.

Остальные этапы геометрического отбора и преобразования координат остаются без изменений. Результатом моделирования на данном этапе становится множество координат отражающих точек  $M$ .

Для того чтобы модель позволяла рассчитывать моменты возникновения радиоотражений и интервалы между ними, предлагается следующий алгоритм. Пусть, согласно модели

[5], активностью радиантов определяется, что в течение часа необходимо сформировать  $Q$  метеорных частиц. Тогда минимальный моделируемый шаг (в секундах) составит

$$s_m = \frac{3600}{Q} \quad (3)$$



На рисунке:

$R$  – пункт размещения приёмника с координатами  $(-1;0;0)$ ;  
 $T$  – пункт размещения передатчика с координатами  $(1;0;0)$ ;  
 $M_0$  – отражающая точка на следе;  
 $C_3$  – половина фокусного расстояния зеркального эллипсоида;  
 $b_3$  – малая полуось эллипсоида;  
 $h$  – высота отражающей точки над поверхностью Земли;  
 $H$  – плоскость, касательная к эллипсоиду

Рис. 1

В процессе моделирования значительная часть из заданных  $Q$  частиц не пройдёт тот или иной этап отбора. Массив номеров  $i$  пригодных для связи частиц  $q_i$  из заданного множества  $Q$  служит для расчёта моментов возникновения отражений:

$$t_i = N_H + q_i s_m, \quad (4)$$

где  $N_H$  – номер часа, для которого осуществляется моделирование.

При необходимости интервал между следами с номерами  $i$  и  $i+1$  может быть найден как

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = (q_{i+1} - q_i) s_m. \quad (5)$$

Результатом моделирования становятся моменты возникновения радиоотражений и интервалы между ними.

Для нахождения времени распространения сигнала по трассе модель необходимо дополнить следующей функцией

$$t_{PPB} = \frac{L}{c} \left( \sqrt{(1-x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} + \sqrt{(-1-x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} \right), \quad (6)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Физическая часть модели [5] в изменениях и дополнениях не нуждается.

Наиболее сложным будет дополнение модели функцией расчёта формы амплитудно-временной характеристики (АВХ). Остановимся на нём более подробно и рассмотрим механизм формирования АВХ.

Как известно [7], основной вклад в величину принимаемого сигнала вносит участок следа, находящийся на таком расстоянии от точки касания, в пределах которого разность хода лучей не превышает половины длины волны (рис. 2), т. е., первая зона Френеля. Её размеры определяются как

$$L_F = \sqrt{\frac{r_{np} r_{nep} \lambda_w}{(r_{np} + r_{nep}) (1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \Phi)}}, \quad (7)$$

где  $r_{пр}$  – расстояние следа до приёмника,  $r_{пер}$  – расстояние от передатчика до следа,  $\lambda_{ш}$  – длина волны,  $\gamma$  – угол между метеорным следом и большим кругом, проведенным через пункты передачи, приема и отражающую точку метеорного следа (на рисунке не показан).

Отражение от участков следа, образующих вторую зону Френеля (если она помещается на следе), уменьшает амплитуду принимаемого сигнала, третья зона вновь усиливает и т. д. Причём, их влияние уменьшается с возрастанием номера. По мере формирования следа в отражении начинают участвовать различные его области, образующие разные зоны Френеля. Это приводит к волнообразному изменению амплитуды отражённого сигнала, которое и описывается АВХ. На рис. 3 представлена фотография АВХ одного из метеорных отражений. Скорость движения метеорной частицы в земной атмосфере может составлять 5–30 км/с. Это означает, что зона Френеля размером, например в 1 км, формируется за несколько десятков – сотен миллисекунд.

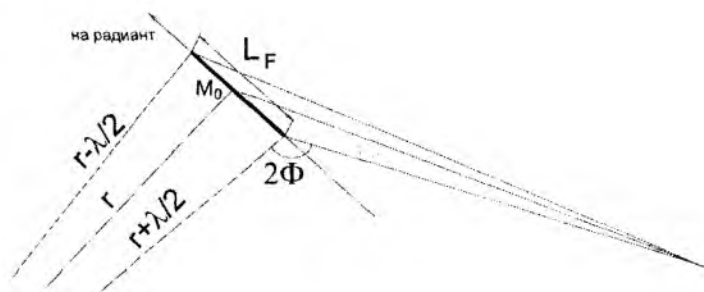


Рис. 2

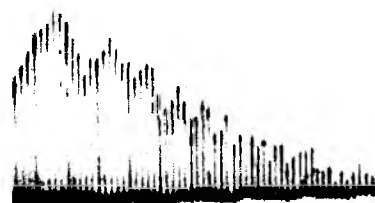


Рис. 3

Если метеорный след располагается точно над серединой трассы (рис. 4), то взаимность МРК, равенство расстояний и углов, а также моментов отражения, позволяют утверждать, что АВХ в обоих пунктах будет идентичной. Несколько сложнее обстоит дело, если метеорный след смещён относительно середины трассы (рис. 5).

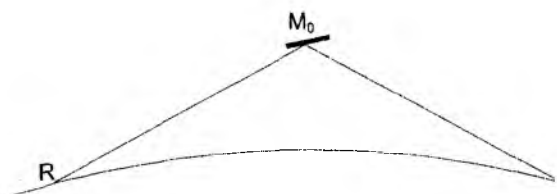


Рис. 4

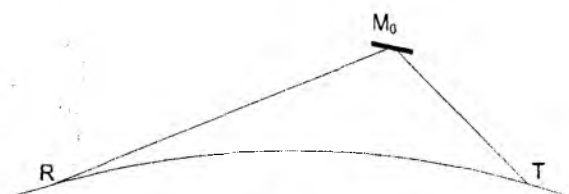


Рис. 5

В этом случае сигнал из пункта Т достигает метеорного следа раньше, чем от R. Тогда на пути сигнала из Т к R дополнительно будет отражать участок следа, сформированный за время, прошедшее с момента отражения сигнала на пути из R в Т. При длине трассы 2000 км разность моментов облучения может составлять около 3 мс. Но, поскольку отражение происходит непрерывно, то для неподвижного следа эта разность приведёт лишь к соответствующему временному сдвигу АВХ в одном пункте относительно другого. Форма огибающей останется неизменной.

Если же имеет место ветровое смещение следа, то даже при скорости ветра 100 м/с, за 3 мс оно составит всего 30 см. При длине следа в несколько километров и размерах зон Френеля в несколько сот метров - единиц километров, такое смещение можно считать пренебрежимо малым. Поэтому, будем считать, что форма АВХ одного и того же следа в двух разнесённых пунктах, соединённых через метеорный радиоканал связи, будет совершенно одинаковой.

Для расчёта интервалов между максимумами АВХ необходимо знать не только размеры зон Френеля и ориентацию следа, но и скорость метеорной частицы. В [5] рассчитывается внеатмосферная скорость частицы  $V_{\infty}$ , которая потом используется для оценки степени ио-

низации (электронной плотности) метеорного следа в физической части модели. Воспользуемся этой скоростью для расчёта АВХ. Время, в течение которого в отражение включается очередная зона Френеля, соответствует времени от максимума до ближайшего минимума АВХ, или от минимума до ближайшего максимума:

$$t_F = \frac{L_F}{V_\infty}. \quad (8)$$

Время существования МРК в каждом сеансе связи рассчитывается в модели [5], поэтому что-либо дополнять здесь не нужно. Стоит лишь отметить, что данная характеристика метеорного следа является наименее удобной для формирования ЧСП. Это объясняется тем, что время, в течение которого возможен приём сигнала от удалённого корреспондента, определяется не только состоянием метеорного радиоканала, но и помеховой обстановкой в пунктах приёма. Уровень помех может быть разным, что может привести к различию в оценке времени существования радиоотражения.

### Выводы

Таким образом, в статье представлена разработанная авторами модель МРК, позволяющая прогнозировать его случайные характеристики. Следует подчеркнуть, что моделирование этих характеристик необходимо только для того, чтобы верно оценить ожидаемый эффект и выбрать наиболее рациональное направление для дальнейшего изучения случайных свойств канала. Оно ни в коей мере не является заменой самого процесса формирования ЧСП на основе реальных метеорных отражений. Моделирование также может применяться для оценки корреляционных связей между различными случайными характеристиками метеорного следа.

Результаты моделирования случайных характеристик МРК и их взаимосвязь могут быть темой отдельной статьи.

**Список литературы:** 1. Антипов И.Е., Костыря А.А., Шернин М.А. Использование метеорного радиоканала для формирования случайной числовой последовательности // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. Вып. 157. С. 25-29. 2. Корнеев В.А., Сидоров В.В., Эпикетов Л.А. О возможности защиты информации на основе использования наносекундной синхронизации шкал времени по метеорным радиоотражениям // Информационные процессы. 2008. Т.8, № 1. С. 10-23. 3. Патент України № 40880. Спосіб незалежного формування випадкової числової послідовності, однакової у двох рознесених пунктах / Антипов І. Е., Костиря О.О., Шернин М. О. Опубл. 27.04.2009. Бюл. № 8. 4. Антипов И.Е., Ткалич И.А., Шернин М.А. Экспериментальная проверка формирования числовой случайной последовательности с использованием метеорного радиоканала / Proceedings of the International Conference TCSET'-2010. Lviv, 2010. P. 245. 5. 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. 6. Антипов И. Е., Коваль Ю. А., Обельченко В. В. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации. Харьков: Коллегиум, 2006. 308 с. 7. Кащеев Б.Л., Бондарь Б.Г. Метеорная связь. Киев: УМК ВО, 1989. 76 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.03.2010