

Том II, с. 457–460

УДК: 621.396 + 537.87

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИООТРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

А. И. Сулимов, А. В. Карпов

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: asulimo@gmail.com

Аннотация. В работе описывается методика имитационного моделирования частотных характеристик метеорных радиоотражений с учетом нестационарности, не взаимности и случайности физических характеристик метеорного канала. Представлены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики канала, полученные путем усреднения большого количества метеорных регистраций, смоделированных для типичной метеорной радиолинии Москва-Казань. Рассматривается проблема неодновременной регистрации сигналов с большим частотным разнесением.

Ключевые слова: метеорное распространение радиоволн; метеорное радиоотражение; частотная характеристика канала; дифракция; не взаимное распространение радиоволн

SIMULATION OF FREQUENCY-SELECTIVE PROPERTIES OF METEOR RADIO SCATTER LINKS

A. I. Sulimov, A. V. Karpov

Abstract. The paper describes a method for simulation of frequency-selectivity of meteor burst channel considering its nonstationarity, nonreciprocity, and random nature. The amplitude-frequency and phase-frequency responses of the channel obtained by averaging a large number of single meteor radio reflections modeled for the typical meteor radio link Moscow-Kazan of 720-km length are presented. A problem of non-simultaneous detection of radio signals with large frequency diversity is considered.

Keywords: meteor burst communications; meteor radio reflection; channel frequency response; diffraction; nonreciprocal radio wave propagation

Введение

Метеорный радиоканал образуется в результате отражения радиоволн метрового диапазона от естественных ионизаций в атмосфере, возникающих на высотах от 70 до 120 км при сгорании мелких твердых частиц космического происхождения. Несмотря на прерывистый характер и малую длительность существования (существует только в течение коротких вспышек метеорных ионизаций длительностью от нескольких миллисекунд до нескольких секунд), метеорный канал обладает рядом полезных свойств, позволяющих строить на его основе специализированные радиосистемы [1]. Особенно перспективными являются системы метеорной синхронизации шкал времени [2] и метеорного распределения ключей шифрования [3], которые используют широкополосные сигналы и частотное разнесение параллельных каналов. Частотные характеристики канала являются важным фактором при разработке указанных радиосистем, определяя их количественные и качественные показатели.

Профиль и динамика изменения частотных характеристик канала значительно изменяются от метеора к метеору случайным образом. При этом частотные свойства канала определяются целым рядом случайных параметров: степенью ионизации метеорного следа, высотой его образования, пространственной локализацией и ориентацией, временем организации сеанса связи и пр. Всё это усложняет экспериментальные исследования, не позволяя достоверно разделить на практике влияние различных физических и технических факторов. Таким образом, имитационное моделирование оказывается одним из преимущественных подходов к изучению частотно-избирательных свойств метеорного радиоканала.

В данной работе обсуждаются некоторые особенности моделирования частотно-избирательных свойств метеорного радиоканала, имеющие важность для прикладных задач. Описываются основные факторы частотной избирательности метеорного радиоканала, приводится методика их учета при моделировании. Кроме того, представлены модельные оценки относительного запаздывания в превышении порога регистрации и оценки соотношения длительностей существования канала для сигналов на различных несущих частотах. Представленные результаты имеют важность как для корректного частотного планирования систем метеорной связи, так и для оптимизации параметров связанных протоколов.

Методика имитационного моделирования

Разработанная имитационная модель позволяет рассматривать одновременное распространение идентичных зондирующих сигналов на m опорных частотах через канал связи, создаваемый случайно генерируемыми метеорными следами. Для каждого метеора ($i = 1..N$) и каждой опорной частоты f_j ($j = 1..m$) вычисляются амплитуды, фазы и поляризации принятого сигнала (радиоотражения). Компоненты вектора частот $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ выстраиваются по возрастанию от наименьшей заданной частоты f_1 до наибольшей f_m . Таким образом, для каждого метеора модель формирует m частотных точек, интерполяция которых позволяет строить интересующие частотные характеристики канала. При этом усреднение по всей выборке сгенерированных метеорных радиоотражений (МРО) позволяет получить интересующую статистику этих характеристик. Модель выполняет вычисления как для прямого (от пункта A к пункту B), так и для обратного (от B к A) распространения сигнала, что позволяет изучать частотную зависимость невзаимных свойств канала. Тем не менее, в данной работе представлены результаты регистрации сигналов только в одной точке (в пункте A).

Согласно классической теории МРО [4], частотная зависимость их мощности описывается приближенным законом $P_T \sim 1/f^3$, поэтому с уменьшением несущей частоты f повышается длительность существования и надежность канала связи. С учетом этого, основным при моделировании считался канал с наименьшей частотой f_1 , для которой и выполнялась генерация метеорных следов. Характеристики остальных частотных каналов моделировались с учетом вектора частотных множителей $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, где $k_j = f_j/f_1$ ($j = 1..m$).

Основные физические факторы частотно-избирательных свойств метеорного радиоканала были рассмотрены в работе [4]. Среди доминирующих выделены: дисперсионные свойства среды распространения сигнала, частотные характеристики ионизированного метеорного следа как рассеивателя и частотные характеристики приемопередающих антенн. В диапазоне частот метеорной связи влияние атмосферы, главным образом, сводится к фарадеевскому вращению плоскости поляризации радиоволны, имеющему обратноквадратичную частотную зависимость. Угол поворота плоскости поляризации для различных зондирующих частот вычислялся как $\Psi_j = \Psi_1/k_j^2$, где Ψ_1 – угол поворота для радиоволны частотой f_1 . Ещё одним эффектом атмосферы является ветровое смещение следа, приводящее к линейному по частоте доплеровскому сдвигу. Для каждого радиоотражения сдвиг случаен, но постоянен в течение всей регистрации. Кроме того, для различных несущих частот отличается температура космических шумов, наводимых в антенне.

Отличия во взаимодействии метеорного следа с падающими радиоволнами различных частот определяются двумя факторами: 1) соотношением размеров следа (прежде всего, текущего радиуса следа $r(t)$) с длиной волны λ ; 2) характерной глубиной проникновения волны в плазму следа. Оба фактора учитывались использованием строгого дифракционного подхода [5], позволявшего вычислять комплексные сечения рассеяния диффузно расширяющегося со временем метеорного следа для каждой из зондирующих частот f_j ($j = 1..m$).

Вследствие масштабирования геометрии и высоты подвеса вместе с длиной волны λ , частотный фактор значительно изменяет поляризационные, фазовые и усилительные характеристики антенн. В метеорной связи широко используются дипольные антенны, обладающие небольшой полосой пропускания, что усиливает частотно-избирательные свойства системы. При моделировании предполагалось, что пункты связи оснащены 5-элементными дипольными антеннами

«волновой канал» горизонтальной поляризации, настроенными на частоту 43,5 МГц. Расчет антенн проводился обобщенным методом наведенных ЭДС. Для учета частотного фактора предварительно была табулирована матрица взаимных комплексных сопротивлений диполей антенны $||\tilde{z}(k_j)|| = ||x(k_j) + i \cdot y(k_j)||$, что позволяло вычислять распределение токов для каждого значения частотного множителя $k_j \in \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$. Поскольку диапазон частот метеорной связи обычно составляет от 30 МГц до 75 МГц, табуляция была выполнена для $k_j = 0,4 \dots 2,5$ с переменным шагом от 0,01 до 0,05. Характеристики антенн для промежуточных значений вычислялись предварительным линейным интерполированием матрицы $||\tilde{z}(k_j)||$. После этого вычислялось распределение токов в антенне и на его основе рассчитывалось излучаемое поле.

В качестве тестовой рассматривалась типичная метеорная радиолиния Москва-Казань протяженностью 720 км. Использовался передатчик мощностью $P_T = 2000$ Вт при пороге регистрации $U_0 = 0,5$ мкВ. Моделировалось одновременное распространение 35 несущих частот из диапазона от 40 МГц до 55 МГц по выборке из $N = 10000$ случайно сгенерированных метеорных следов. Полученные результаты обсуждаются в следующем разделе.

Результаты моделирования частотных характеристик метеорного радиоканала

Для синтеза усредненных частотных характеристик метеорного канала было смоделировано 10000 радиоотражений, среди которых 8682 оказались радиоотражениями от недоуплотненных и 1318 от переуплотненных следов. При этом 1398 МРО проявили признаки частотно-селективного федингования сигнала и имели меньшую полосу пропускания.

Энергетический потенциал метеорной радиолинии проявляет сильную зависимость от частоты, что вызывает различия в моментах регистрации сигнала $t_H(f)$ и длительности радиоотражений $T(f)$ для разных частот. При организации многочастотных когерентных фазовых измерений (например, в системах метеорной синхронизации [2]) одной из проблем является неодновременность превышения порога регистрации на разных частотах, что вносит дополнительную задержку в функционирование системы. На рис. 1 представлены результаты обработки модельных МРО, демонстрирующие частотную зависимость средней задержки регистрации сигнала t_H

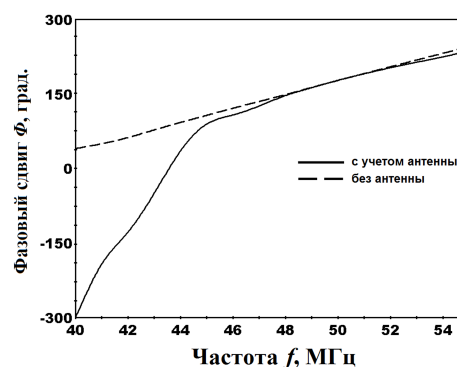
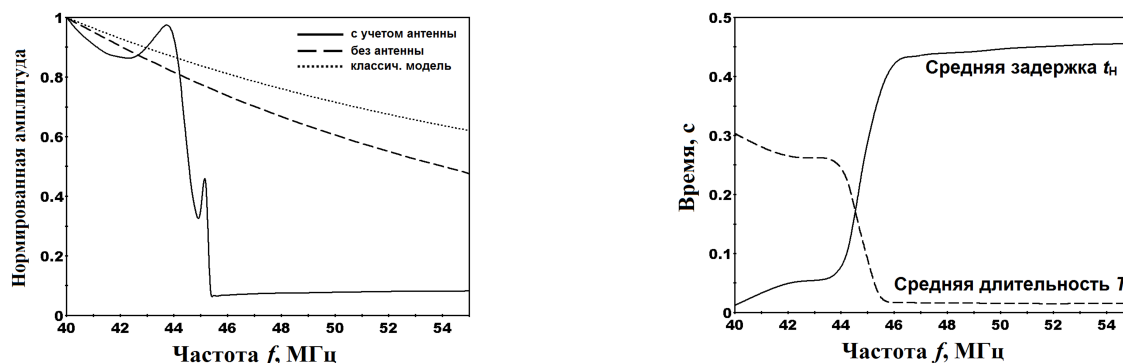


Рис. 1. Частотная зависимость временных параметров метеорных радиоотражений.

после образования метеорного следа, а также средней длительности T радиоотражений. Хорошо заметно, что обе зависимости обратны друг другу, коррелируя с коэффициентом $-0,997$. Наименьшая задержка регистрации $t_H \sim 12 < A$ наблюдалась на основной частоте f_1 , для которой достигалась наибольшая мощность МРО. С повышением частоты мощность МРО быстро падала, что сокращало длительность T регистрации сигнала. При этом также росла и задержка t_H начального момента его регистрации. Последний эффект пока не получил полного объяснения, и, по-видимому, связан с необходимостью стабилизации физических характеристик расширяющегося (вследствие амбиполярной диффузии) метеорного следа для достижения конструктивного рассеяния радиоволн с малой длиной волны.

На рис. 2 представлены усредненные по всем модельным радиоотражениям амплитудно-частотная (рис. 2а) и фазово-частотная (рис. 2б) характеристики канала. Чтобы оценить вклад антенн, моделирование проводилось как при учете, так и без учета их частотных характеристик. Результаты показали, что избирательные свойства дипольных антенн типа «волновой канал» [4] значительно влияют на характеристики радиоканала, сокращая полосу пропускания с 6,9 МГц до 4,3 МГц. Таким образом, именно антенная система в подавляющей степени ограничила полосу пропускания канала. На рис. 2а коротким пунктиром также нанесена кривая $\sim f^{-3/2}$, построенная согласно классической модели радиоотражения от метеорного следа. Сравнение амплитудных характеристик показывает, что более точный учет взаимодействия радиоволн с плазмой

метеорного следа [5] наряду с учетом поляризационных явлений при метеорном распространении усиливают частотную избирательность канала.



а) амплитудно-частотная характеристика

б) фазово-частотная характеристика

Рис. 2. Усредненные частотные характеристики метеорного радиоканала.

Из рис. 1б видно, что фазово-частотная характеристика метеорного канала практически линейна во всем рассмотренном диапазоне частот. При этом антенная система вносила дополнительный сдвиг фазы, изменяя угол наклона ФЧХ. Однако за пределами полосы пропускания антенная система практически не влияла на фазовую характеристику канала.

Заключение

Корректное моделирование частотных характеристик метеорного канала требует учета особенностей рассеяния радиоволн различной поляризации и длины волны на метеорных следах, что возможно только на основе строгого дифракционного подхода. Одновременная регистрация в метеорном канале сигналов с большим частотным разнесением проблематична, вследствие значительной задержки в превышении порогового уровня и сокращения длительности существования канала в области высоких частот. Типичная полоса пропускания метеорного канала составляет около 7 МГц, но может значительно сокращаться частотно-избирательными свойствами антенной системы. Рассеяние на метеорном следе вносит дополнительный сдвиг фазы, линейно растущий по частоте, что необходимо учитывать при выполнении когерентных многочастотных фазовых измерений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы Повышения Конкурентоспособности Казанского Федерального Университета.

Список литературы

1. Oetting J.D. An analysis of meteor burst communications for military applications // IEEE Trans. on comm. – 1980. – vol. COM-28. – no. 9. – pp. – 1591-1601.
2. Epictetov L.A. Application of Meteor Burst Equipment for High Precision Comparisons of Time and Frequency Standards // Proc. of 7th European Frequency and Time Forum (EFTF). – 1993. – pp. 413-416.
3. Сулимов А.И., Карпов А.В., Сидоров В.В., Шерстюков О.Н. Генерация и распределение ключей симметричного шифрования на основе физических свойств радиометеорного распространения // Сб. докл. XXIII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн». – 2011. – Т.1. – с. 421-425.
4. Sulimov A.I., Safiullina A.R., Karpov A.V. Comparison of frequency-selective properties of meteor burst channel at the beginning and at the end of radio reflections from meteor trails // Proc. of 2017 Int. Conf. on Radiation and Scattering of Electromagn. Waves (RSEMW-2017). – 2017. – pp. 142-145.
5. Sulimov A.I., Karpov A.V., Lapshina I.R., Khuzyashev R.G. Analysis and Simulation of Channel Nonreciprocity in Meteor-Burst Communications // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2017. – vol. 65. – iss. 4. – pp. 2009-2019.