

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ОДНОРОДНОМ РАДИОКАНАЛЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН

М.С. Пензин, Н.В. Ильин

MODELING DOPPLER FREQUENCY SHIFT IN NON-STATIONARY HOMOGENEOUS RADIO CHANNEL USING METHOD OF NORMAL WAVES

M.S. Penzin, N.V. Ilyin

В работе представлены результаты моделирования распространения когерентной последовательности импульсов в радиоканале Земля-ионосфера, выполненного в рамках метода нормальных волн. Использование когерентной последовательности импульсов позволило разделить сигнал в точке приема на отдельные лучи. На основе данных моделирования была получена зависимость доплеровского смещения частоты от времени для каждого луча в отдельности в нестационарном однородном радиоканале.

There are presented the results of modeling of the propagation of the coherence pulse sequence through the Earth-ionosphere radio channel by the method of normal waves in the report. Using the coherence pulse sequence allow us to separate signal into rays. Dependencies of the Doppler frequency shift of the time for each ray in the non-stationary homogeneous radio channel are obtained basing on the result of modeling.

Введение

Нестационарность ионосферной плазмы приводит к тому, что макроскопические уравнения Максвелла являются интегро-дифференциальными, если учитывать частотную дисперсию. Стационарность среды, даже при наличии частотной дисперсии, позволяет избавиться от интеграла по времени, сведя задачу к чисто дифференциальному уравнению по пространству.

В случае отсутствия т.н. материальной дисперсии, когда электрическая индукция пропорциональна напряженности электрического поля, зависимость диэлектрической проницаемости от времени приводит к дифференциальному уравнению с переменными коэффициентами. При этом нелокальная дисперсия, то есть зависимость от частоты или длины волны, вызванная геометрией задачи, может присутствовать, как, например, в нестационарной оптике.

При моделировании распространения радиоволн в нестационарной ионосфере мы ограничены двумя факторами: дисперсия не позволяет сформировать слишком короткий сигнал, а нестационарность не дает анализировать слишком длинные сигналы. Однако дисперсия и нестационарность канала несущественно влияют на импульсы, ширина полосы которых существенно меньше полосы когерентности канала (порядка одного мегагерца), а длительность сравнима со временем распространения и существенно меньше характерного времени изменения параметров канала. Но одиночные импульсы не дают возможность измерить скорости изменения ионосферных параметров. Характерные величины значений доплеровских (параметрических) сдвигов частоты квазимонохроматического радиосигнала в КВ диапазоне, прошедшего ионосферный радиоканал, составляют герцы или доли герца. Для измерения таких величин необходимы сигналы длительностью до десятков секунд, либо когерентные последовательности импульсов. Данное ограничение можно обойти, воспользовавшись когерентной последовательностью импульсов. Тогда в этом случае возможна регистрация спектра всей последователь-

ности, который является линейчатый, либо можно регистрировать и анализировать амплитуду и фазу каждого отдельного импульса.

В случае изменения параметров среды, меняются не только фазы и амплитуды, но и задержки импульсных сигналов. Однако несложно установить, что при спектральных измерениях когерентной последовательности импульсов, только изменения фазы передаточной функции канала (которая и определяет среднюю фазу амплитудно-модулированного импульса) приводят к изменениям положения спектральных линий в линейчатом спектре. Ни изменения амплитуд, ни изменения задержек к сдвигам центральной линии не приводят. Изменения амплитуд приводят к деформации спектральных линий, а изменение задержки, приводит к малому изменению расстояния между спектральными линиями, не меняя положения и формы центральной линии.

Таким образом, фаза и амплитуда сигнала плавно меняются от импульса к импульсу, при этом изменение амплитуды можно не учитывать. Скорость же изменения фазы можно трактовать как доплеровское смещение частоты.

В случае многолучевого радиоканала, импульсы, соответствующие отдельно взятым лучам, в точке приема могут быть разделены по задержкам.

Исходя из этого, имея модель передаточной функции многолучевого радиоканала, параметры которого медленно и непрерывно меняются с течением времени, можно отслеживать фазу, а следовательно, и доплеровское смещение частоты, для каждого луча в отдельности с помощью когерентной последовательности импульсов.

Прохождение когерентной последовательности импульсов через радиоканал

Рассмотрим узкополосные амплитудно-модулированные импульсы с несущей частотой ω_0 и амплитудой $a(t)$. Импульсы повторяются через промежутки времени T . Когерентная последовательность излученных импульсов записывается в виде следующего выражения:

$$f(t) = \sum_k a(t - kT) \cos(\omega_0 t). \quad (1)$$

Канал в полосе сигнала будем характеризовать передаточной функцией:

$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{i\Phi(\omega)} \approx H_0 (1 - \gamma_0 (\omega - \omega_0)) e^{i\Phi_0 + i\tau_0 (\omega - \omega_0)}, \quad (2)$$

где $H_0 = |H(\omega_0)|$ – модуль передаточной функции на несущей частоте, $\tau_0 = \Phi'(\omega_0)$ – групповая задержка импульсного сигнала, равная производной фазы передаточной функции по частоте, $\gamma_0 = \ln(|H(\omega)|')$ – логарифмическая производная модуля передаточной функции по частоте, характеризующая искажения импульса в первом порядке по ширине полосы, $\Phi_0 = \Phi(\omega_0)$ – фаза передаточной функции на несущей частоте.

Если рассматривать по отдельности изменения каждого из параметров (2) с течением времени и влияние этого изменения на спектр когерентной последовательности (1), можно увидеть, что к видимому сдвигу частоты приводит только изменение Φ_0 . Изменение остальных параметров приводит только к изменению деформации огибающей спектра.

Следовательно, фаза импульса является наиболее чувствительной к изменениям параметров радиоканала.

Моделирование

Моделирование доплеровского сдвига проводилось на основе метода нормальных волн. В отличие от геометрического подхода, в рамках данного подхода можно моделировать динамику изменения поля в конкретной точке пространства, что позволяет отслеживать плавные изменения фаз импульсов.

В методе нормальных волн передаточная функция канала может быть записана как [Куркин и др., 1981]:

$$H(\omega) \approx \sum_k \frac{A_n}{r r_0^2 \sqrt{\sin \theta}} I_n(r_0, 0) I_n(r, \theta) \exp \left[ika \int_0^\theta \gamma_n(\tilde{\theta}) d\tilde{\theta} \right], \quad (3)$$

где A_n – системный коэффициент, r_0 – высота излучателя, r и θ – координаты приемника, I_n – коэффициенты возбуждения, a – радиус Земли, k – волновое число, γ_n – спектральный параметр радиального уравнения.

Фазы нормальных волн имеют порядок 10^5 , такой же порядок имеют и абсолютные фазы отдельных импульсов. При этом для фиксированных точек излучения и приема для квазимонохроматического сигнала на несущей частоте ω_0 , сумма распадается на несколько сумм, соответствующих геометрическим лучам [Потехин и др., 1981].

В качестве примера, рассмотрим многолучевой радиоканал. Расстояние между точками излучения и приема 3500 км. Среда распространения задавалась профилем электронной концентрации в виде двух квазипарабол [Куркин и др., 1981]: высота начала ионосферы – 90 км, точка шивки – 195 км, высота

максимума – 300 км, критическая частота – 6 МГц.

С течением времени критическая частота меняется по закону

$$f_{cr}(t) = f_{cr0} \left[1 + a_f \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \sin \left(\frac{10\pi}{T} t \right) \right], \quad (4)$$

где $a_f = 0.01$, $T = 7200$ сек.

Также с течением времени изменяется положение точки начала ионосферы:

$$h_b(t) = h_{b0} \left[1 + 0.5a_h - 0.5a_h \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right], \quad (5)$$

где $a_h = 0.000785$.

Через данный радиоканал была пропущена последовательность когерентных импульсов с частотой несущего сигнала – 10 МГц, длина одного импульса – 120 мкс.

В каждый момент времени моделировалось прохождение одного импульса через ионосферный радиоканал. Затем в точке приема, после демодуляции, импульсы разделялись по задержкам. Затем для каждого импульса находилась средняя амплитуда и средняя фаза.

Фазы отдельно взятых лучей, полученные в результате моделирования прохождения когерентной последовательности импульсов через ионосферный радиоканал, представлены на рис. 1. В точку приема приходит четыре луча: два двухскачковых и два трехскачковых. Видно, что нижние лучи, особенно двухскачковый, более подвержены изменениям нижней части ионосферы, где лежат их области отражения. В то же время, верхние лучи, особенно двухскачковые, более чувствительны к изменениям в верхней части ионосферы (в данном случае к изменению критической частоты). Данное поведение характерно и для реальных сигналов.

Доплеровское смещение частоты, в данном случае, можно определить как скорость изменения фазы (рис. 2). Наблюдается, так называемая, «тонкая структура» доплеровского смещения частоты в зависимости от изменения параметров среды.

Заключение

Предложен метод моделирования доплеровского смещения частоты в многолучевых радиоканалах для когерентной последовательности импульсов, позволяющий отслеживать детальную динамику

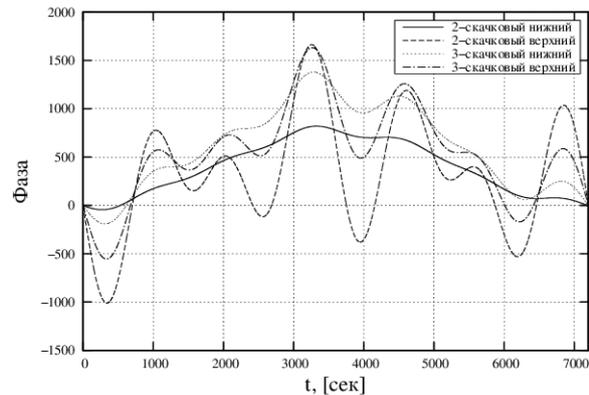


Рис. 1. Фазы отдельно взятых лучей.

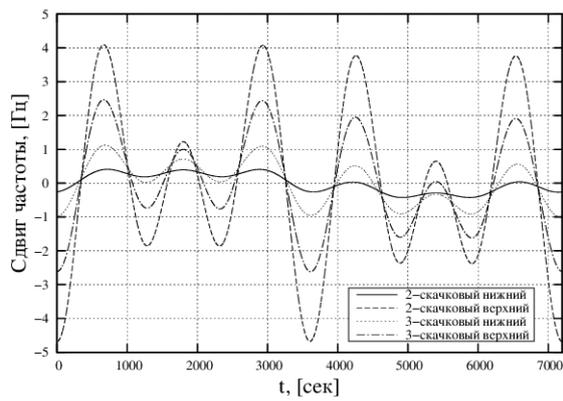


Рис. 2. Доплеровское смещение частоты.

изменения параметров радиоканала. Показано, что на изменение характеристик отдельного луча влияют вариации параметров ионосферы в областях отражения.

Работа выполнена в рамках программы ФНИ государственных академий наук № П.12.2.2 и при поддержке гранта РФФИ № 13-05-00979

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.

Потехин А.П., Орлов И.И. Приближенная формула суммирования ряда нормальных волн // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1981. Вып. 57. С. 135–137.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия