

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА В УКВ-ДИАПАЗОНЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ТРОПОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, ivonin1480@mail.iszf.irk.ru

SIMULATION OF RADAR SIGNALS IN THE VHF RANGE, TAKING ACCOUNT OF THEIR PROPAGATION EFFECTS IN THE TROPOSPHERE AND IONOSPHERE

V.A. Ivonin, V.P. Lebedev

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivonin1480@mail.iszf.irk.ru

Аннотация. В работе описан программный комплекс, разрабатываемый для моделирования распространения радиосигнала в УКВ-диапазоне в тропосфере и ионосфере Земли, а также для моделирования принятых радаром радиолокационных импульсов, отраженных от космических объектов. Особое внимание уделено эффектам Фарадея и Коттона — Мутона, приводящим к изменению поляризационного состояния радиоволны. Проведено сравнение результатов моделирования эффекта Фарадея с результатами эксперимента на Иркутском радаре некогерентного рассеяния, а также приведены результаты моделирования эффекта Фарадея для пролетов спутников Starlink.

Ключевые слова: эффект Фарадея, эффект Коттона—Мутона, распространение радиоволн, ионосфера, радиолокация, ИРНР.

Abstract. The paper describes a software package developed to simulate the propagation of a radio signal in the VHF range in the Earth's atmosphere, namely in the troposphere and ionosphere, as well as to simulate radar pulses received by a radar reflected from space objects. Particular attention is paid to the Faraday and Cotton-Mouton effects, which lead to a change in the polarization state of the radio wave. The results of modeling the Faraday effect are compared with the results of the experiment on the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR), and the results of modeling the Faraday effect for the passages of Starlink satellites are presented.

Keywords: Faraday effect, Cotton–Mouton effect, propagation of radio waves, ionosphere, radar, IISR.

ВВЕДЕНИЕ

В радиолокационных УКВ-измерениях координатная и некоординатная информация наблюдаемого космического объекта (КО) определяется косвенно на основе измеряемых параметров радиолокационного (РЛ) сигнала. Проходя через тропосферу и ионосферу, РЛ-сигнал приобретает дополнительную задержку, происходит изменение его поляризационного состояния и т. д. Для исправления ошибок необходима модель среды распространения РЛ-сигнала, с помощью которой параметры РЛ-сигнала могут быть связаны с информацией о наблюдаемом КО. Успешное решение задачи учета среды распространения РЛ-сигналов определяет качество получаемой координатной и некоординатной информации.

Для моделирования радиоканала при радиолокации КО разрабатывается программный комплекс (ПК), который моделирует принятые ИРНР [Лебе-

дев, 2015] РЛ-импульсы с учетом явлений, происходящих при прохождении радиоволны через тропосферу и ионосферу Земли: рефракция, эффекты Фарадея и Коттона — Мутона, временная задержка. В данной работе приведено описание моделирования этих эффектов.

Описание программного комплекса

Программный комплекс состоит из модулей, каждый из которых отвечает за расчет того или иного физического эффекта, и каждый из которых во время настройки параметров моделирования можно подключать/отключать. Сделано это для того, чтобы можно было изучать влияние только отдельного эффекта или группы эффектов на радиосигнал [Ivonin, Lebedev, 2021]. На рис. 1 представлена блок-схема ПК.



Рис. 1. Блок-схема программного комплекса

Программный комплекс способен выполнять следующие действия:

- 1) моделировать по эфемеридам принятые ИРНР РЛ-импульсы, отраженные от КО;
- 2) моделировать по реально принятым ИРНР РЛ-импульсам, отраженным от КО, и по эфемеридам принятые ИРНР РЛ-импульсы, отраженные от КО;
- 3) выполнять поиск ракурсных поверхностей;
- 4) вносить рефракционные дальностные и угломестные поправки в файлы с данными о реально принятых ИРНР сигналах, отраженных от КО, а также для этих сигналов рассчитывать квадрат косинуса угла поворота плоскости поляризации вследствие эффекта Фарадея;
- 5) моделировать эффекты Фарадея и Коттона — Мутона по заданным направлениям;
- 6) использовать для моделирования среды различные модели геомагнитного поля и ионосферы.

Моделирование эффектов Фарадея и Коттона — Мутона

Под действием геомагнитного поля ионосфера Земли становится анизотропной невзаимной средой, и поэтому уравнение комплексного угла эллипса поляризации электромагнитной волны в ионосфере будет выглядеть так [Рытов и др., 1974]:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{T_{\text{крч}}} + \frac{\omega}{2c} v \sqrt{u} \cos(\alpha) - i \frac{\omega}{4c} v u \sin^2(\alpha) \sin(2(\theta + \beta)),$$

где $\theta = \text{arctg}\left(\frac{\Phi_v}{\Phi_b}\right) = \theta' + i\theta''$, где Φ_v , Φ_b — про-

екции вектора напряженности электрического поля радиоволны на главную нормаль и бинормаль к лучу соответственно (рис. 2), θ' — угол между большой полуосью эллипса поляризации и главной нормалью к лучу, $\theta'' = \text{arctg}\left(\frac{b}{a}\right)$, где b — малая полуось эллипса поляризации, a — большая полуось эллипса поляризации, ds — элемент длины дуги вдоль траектории луча радиоволны, $T_{\text{крч}}$ — радиус кручения луча, $\omega = 2\pi f$, f — частота радиоволны, c — скорость света в вакууме, $v = \frac{f_{\text{пл}}^2(N_e)}{f^2}$, N_e — электронная кон-

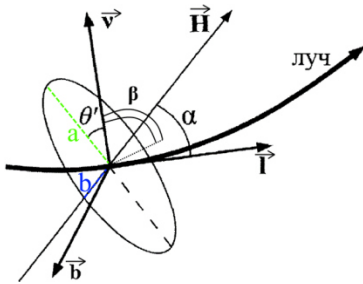


Рис. 2. Ориентация эллипса поляризации радиоволны при ее распространении: \vec{v} — главная нормаль луча, \vec{b} — бинормаль луча, \vec{l} — касательная к лучу

центрация ионосферы, $f_{\text{пл}} = \frac{q_e}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e}{\epsilon_0 m_e}}$ — плазменная частота ионосферы, q_e — заряд электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная, m_e — масса электрона,

$$\sqrt{u} = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{q_e \mu_0 |\vec{H}|}{m_e \omega}, \quad \omega_H \text{ — гирочастота, } \mu_0 \text{ — маг-$$

нитная постоянная, \vec{H} — напряженность геомагнитного поля, α — угол между лучом радиоволны и \vec{H} , β — угол между главной нормалью к лучу и плоскостью, образованной \vec{H} и единичным вектором касательной к лучу (рис. 2). Как видно из рис. 2, положение эллипса поляризации радиоволны задается с помощью трехгранника Френе [Рытов, 1938]. Первое слагаемое в формуле (1) описывает вращение плоскости поляризации, обусловленное кручением луча, второе — эффектом Фарадея, а третье — вращение плоскости поляризации и деформацию эллипса поляризации, обусловленные эффектом Коттона — Мутона. Первым слагаемым при решении задач распространения радиоволн в УКВ-диапазоне можно пренебречь [Олюнин, 2011]. Видно, что эллипс может как поворачиваться, что приводит к повороту плоскости, в которой преимущественно происходит изменение вектора напряженности электрического поля волны, так и деформироваться, что приводит к изменению вида поляризации волны (линейная, круговая или эллиптическая). (1)

Моделирование этих эффектов осуществляет блок расчета поляризации (рис. 1) с помощью численного решения методом Рунге — Кутты четвертого порядка следующей системы уравнений, к которой сводится уравнение (1):

$$\left\{ \begin{aligned} \Omega(s) &= \theta_0 + \frac{\omega}{2c} \int_0^s v(s') \sqrt{u(s')} \cos(\alpha(s')) ds', \\ \frac{d\chi_{\text{Re}}}{ds} &= \frac{\omega}{4c} v u \sin^2(\alpha) \times \\ &\times \cos(2(\beta(s) + \Omega(s) + \chi_{\text{Re}}(s))) \sinh(2\chi_{\text{Im}}(s)), \\ \frac{d\chi_{\text{Im}}}{ds} &= \frac{\omega}{4c} v u \sin^2(\alpha) \times \\ &\times \sin(2(\beta(s) + \Omega(s) + \chi_{\text{Re}}(s))) \cosh(2\chi_{\text{Im}}(s)), \end{aligned} \right.$$

где Ω — угол поворота эллипса поляризации вследствие эффекта Фарадея, $\chi = \theta - \Omega = \chi_{\text{Re}} + i\chi_{\text{Im}}$, χ_{Re} и χ_{Im} — соответственно вещественная и мнимая части эффекта Коттона — Мутона.

Разработанный программный комплекс использовался для интерпретации измерений РЛ-сигналов ИРНР, отраженных от КА Starlink. Большое количество таких однотипных КА, пролетающих через центр сектора сканирования ИРНР на дальности ~550 км, позволило проводить наблюдения с интервалом 5 мин. На рис. 3 сплошной линией представлена измеренная на ИРНР амплитуда РЛ-сигнала, отраженного от КА Starlink (28.02–04.03.2022), штриховой линией — $\cos^2(\Omega)$, рассчитанный по изме-

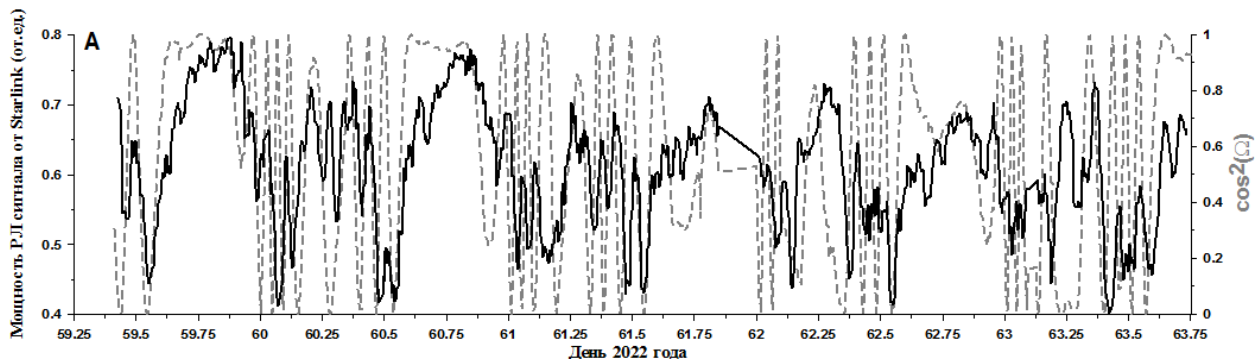


Рис. 3. Сплошная линия — динамика измеренной амплитуды РЛ-сигнала ИРНР от КА Starlink, штриховая линия — $\cos^2(\Omega)$, восстановленный по профилю электронной концентрации

ренному на ИРНР профилю электронной концентрации. Видно, что в целом амплитуда достаточно хорошо повторяет динамику $\cos^2(\Omega)$: коэффициент корреляции 0.2–0.8. Интервалы, на которых поведение обсуждаемых параметров различается, говорят либо о неучтенных возмущениях в измеренном профиле электронной концентрации, либо о том, что ориентация данного КА отличается от ориентации основного созвездия объектов Starlink.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный комплекс для моделирования распространения радиоволн УКВ-диапазона в тропосфере и ионосфере Земли. Описан способ расчета эффектов Фарадея и Коттона — Мутона. Продемонстрированы результаты расчетов эффекта Фарадея для Иркутского радара некогерентного рассеяния на примере плотных РЛ-измерений характеристик КА Starlink.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лебедев В.П. *Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов*: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Иркутск, 2015. 118 с.
- Олюнин Н.Н. *Использование поляризметрических данных радиолокационных станций дальнего обнаружения для распознавания целей*: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. М., 2011. С. 66.
- Рыгов С.М. О переходе от волновой к геометрической оптике. *Доклады Академии наук СССР*. 1938. Т. 18, № 4–5. С. 263–266.
- Рыгов С.М., Кравцов Ю.А., Виноградов А.Г. *Вопросы излучения и распространения радиоволн*. М.: РИАН СССР, 1974. С. 35.
- Ivonin V.A., Lebedev V.P. Simulation of radar signals in the VHF range, taking account of their propagation effects in the troposphere and ionosphere. *2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2021. P. 2519–2525.