

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ

© А. М. Симаков^{1,*}, А. О. Щирый²

¹ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», Москва, Россия

²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: nickhaos9@gmail.com

Представлен прототип синтеза ионограмм вертикального радиозондирования ионосферы на основе физически информированных нейросетей. PINN аппроксимирует высотный профиль электронной концентрации в модели баланса с источником, потерями и эффективным транспортом; затем профиль преобразуется в кривую действующей высоты $h'(f)$. В пилотном расчете получены $foF2 = 9.36$ МГц и $hmF2 = 340.0$ км.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, радиозондирование, электронная концентрация, физически информированная нейросеть, PINN, действующая высота

Preliminary results of ionogram synthesis by physics-informed neural networks.

Simakov A. M., Schiriy A. O.

Abstract. A prototype of vertical-sounding ionogram synthesis is presented. A physics-informed neural network approximates an electron-density profile constrained by a one-dimensional balance equation. The resulting profile is converted to plasma frequency and to an O-mode virtual-height trace. A pilot run gives $foF2 = 9.36$ MHz and $hmF2 = 340.0$ km.

Keywords: *ionosphere, ionogram, radio sounding, electron density, physics-informed neural network, PINN, virtual height*

Введение

Радиозондирование ионосферы является одним из наиболее информативных способов исследования состояния ионосферной плазмы и ионосферных радиолиний [1]. Результаты работы ионозонда представляются в виде ионограммы [1]. Существуют различные виды радиозондирования ионосферы. Ионограмма вертикального радиозондирования ионосферы представляет собой зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты f и действующей высоты отражения h' . Однако в процессе обработки и интерпретации реальных ионограмм возникает потребность в создании синтетических ионограмм, позволяющих идентифицировать треки мод распространения сигнала, отличать полезный сигнал от фоновых шумов и сосредоточенных помех, а также отлаживать алгоритмы автоматической обработки [2, 3]. Традиционно синтез ионограмм основывался на решении краевой задачи распространения радиоволн в двумерно-неоднородной ионосфере. Однако появление физически информированных нейронных сетей открывает новые возможности в синтезе ионограмм [4].

Цель настоящей работы – разработка и апробация нового метода синтеза ионограмм, в котором профиль электронной концентрации не задается непосредственно аналитической

кривой, а получается как решение дифференциальной задачи, аппроксимируемое физически информированной нейросетью (physics-informed neural network, PINN). Такая постановка рассматривается как промежуточный этап между процедурной генерацией изображений и полноценным восстановлением состояния ионосферы по данным наблюдений.

1. Модель высотного профиля

Физической основой служит уравнение баланса для электронной концентрации [5]

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = P - L - \frac{\partial J}{\partial h}, \quad (1)$$

где N_e – концентрация электронов, P – скорость ионообразования, L – потери, J – вертикальный поток заряженных частиц.

В реализованном прототипе рассматривается нормированная высота $x \in [0, 1]$ и нормированная концентрация $n(x)$. Для синтеза высотного профиля используется следующая стационарная постановка:

$$\frac{d}{dx} \left(D(x) \frac{dn}{dx} \right) + q(x) - \alpha(x)n^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь $D(x)$ – эффективный коэффициент транспорта, возрастающий в верхней части расчетной области; $\alpha(x)$ – эффективный коэффициент потерь, более высокий в нижней ионосфере; $q(x)$ – заданный источник ионизации. Для основного вклада области F применяется пик-нормированная чепменовская форма

$$q_F(x) = A_F \exp\{1 - z - \exp(-z)\}, \quad z = \frac{x - x_m}{H_x}, \quad (3)$$

дополненная слабыми вкладами областей E и F1.

Переход от безразмерной переменной x к физической высоте далее выполняется линейным отображением $h = h_0 + (h_1 - h_0)x$, где в пилотном расчете $h_0 = 90$ км и $h_1 = 520$ км. Такая нормировка удобна для PINN-оптимизации: величины в уравнении (2) имеют сопоставимый масштаб, а сами коэффициенты $D(x)$, $\alpha(x)$ и $q(x)$ легче варьировать без численной жесткости. Нижняя граница интервала соответствует области ниже основного максимума слоя F, тогда как верхняя граница выбрана так, чтобы сохранить заметную электронную концентрацию над максимумом и не обрезать профиль искусственно.

2. PINN-постановка

Нейросеть $\hat{n}_\theta(x)$ принимает высоту x и возвращает положительную оценку концентрации. Производные по высоте вычисляются автоматическим дифференцированием. В функционал обучения включена невязка уравнения (2), граничные ограничения, слабый prior на чепменовскую форму и якоря на диагностические параметры f_oF2 и $hmF2$:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \lambda_R \langle R_\theta^2(x) \rangle + \lambda_b (\hat{n}_\theta(0) - n_b)^2 + \lambda_t (\hat{n}_\theta(1) - n_t)^2 \\ & + \lambda_f (\hat{n}_\theta(x_m) - n_m)^2 + \lambda_h \left(\frac{d\hat{n}_\theta}{dx}(x_m) \right)^2 + \lambda_p \langle (\hat{n}_\theta(x) - n_p(x))^2 \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

где R_θ – левая часть (2), x_m соответствует целевой высоте максимума слоя F2, n_m – концентрация, соответствующая целевой частоте f_oF2 , $n_p(x)$ – гладкий профиль-prior.

Такой функционал не сводится к простому «подгону» двух параметров. Слагаемое невязки уравнения задает физическую согласованность профиля во всей области, граничные штрафы стабилизируют решение на краях интервала, а prior ограничивает класс допустимых форм разумными гладкими профилями. Якорь на $hmF2$ фиксирует положение главного максимума, а якорь на f_oF2 определяет его масштаб по концентрации. В результате PINN получает достаточную свободу для перестройки формы $N_e(h)$, но не уходит в нефизические осциллирующие решения, которые часто возникают в плохо обусловленных обратных задачах.

Важно подчеркнуть ограничение текущей постановки: целевые значения f_oF2 и $hmF2$ использованы как управляющие параметры синтеза. Реальные ионограммы в обучение на данном этапе не включались.

3. Переход от профиля к ионограмме

После обучения профиль переводится в физические единицы. Плазменная частота вычисляется по формуле

$$f_p(\text{МГц}) = 8.98 \cdot 10^{-6} \sqrt{N_e(\text{м}^{-3})}. \quad (5)$$

Для формирования следа ионограммы используется приближение обыкновенной компоненты без магнитного поля и столкновений. Групповой показатель задан как

$$n_g(f, h) = \frac{1}{\sqrt{1 - (f_p(h)/f)^2}}. \quad (6)$$

Действующая высота $h'(f)$ рассчитывается численным интегрированием n_g от нижней границы модели до точки поворота луча с добавлением участка свободного распространения от земли до нижней границы. Полученная кривая рендерится в полутоновое изображение; дополнительно вводятся фоновый шум и вертикальные помеховые структуры, характерные для представления ионограмм как изображений [2, 3].

В выбранном приближении отражение обыкновенной компоненты происходит в окрестности высоты, где $f_p(h)$ достигает частоты зондирования. Поэтому форма трассы $h'(f)$ определяется не только положением максимума $N_e(h)$, но и тем, насколько быстро возрастает профиль на подходе к слою F2. Более пологий рост дает большую действующую высоту на промежуточных частотах, тогда как резкий фронт приводит к более компактной трассе. Это важно для синтетических данных: даже при одинаковом f_oF2 разные формы профиля дают различимую геометрию следа на ионограмме.

4. Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте целью синтеза были выбраны $f_oF2 = 9.4$ МГц и $hmF2 = 340$ км. В обучении использовались 10000 эпох, 1536 случайных коллокационных точек на эпоху и шаг оптимизатора Adam $5 \cdot 10^{-4}$. Расчетная область по высоте составляла 90–520 км.

Таблица 1. Основные численные результаты пилотного расчета.

Параметр	Значение
Финальная невязка уравнения, L_R	$3.08 \cdot 10^{-3}$
Оценка f_oF2	9.36 МГц
Оценка $hmF2$	340.0 км
Максимум N_e	$1.09 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$
f_p на верхней границе, 520 км	5.15 МГц
Диапазон частот с отражением	1.23–9.34 МГц
Диапазон рассчитанных h'	97.8–604.8 км

Контрольные значения действующей высоты составили $h'(3 \text{ МГц}) = 186.1$ км, $h'(5 \text{ МГц}) = 287.6$ км, $h'(7 \text{ МГц}) = 359.8$ км, $h'(9 \text{ МГц}) = 457.1$ км.

Полученные значения показывают, что расчет воспроизводит не только заданное положение максимума, но и разумный ход групповой задержки в широком диапазоне частот. В частности, $f_p(520 \text{ км}) = 5.15$ МГц указывает на сохранение заметной концентрации на верхней границе расчетной области; это означает, что максимум слоя F2 не сформирован за счет искусственного прижатия решения к нулю на верхнем крае интервала. Рост $h'(f)$ при приближении к f_oF2 согласуется с физическим смыслом действующей высоты: по мере уменьшения знаменателя в (6) возрастает вклад группового замедления волны.

На рис. 1 представлены использованный высотный профиль источника и соответствующий ему профиль плазменной частоты. Видно, что основной вклад источника сосредоточен в области F, а максимум $f_p(h)$ формируется вблизи целевого значения $hmF2$. На рис. 2 приведены восстановленный профиль электронной концентрации и рассчитанная высотно-частотная характеристика. Эти зависимости демонстрируют согласованность между формой $N_e(h)$ и поведением $h'(f)$ в рабочем диапазоне частот. На рис. 3 показано соответствующее синтетическое изображение ионограммы в инвертированной палитре.

5. Обсуждение

Предложенный тракт демонстрирует возможность получить согласованную цепочку

$$\hat{n}_\theta(x) \longrightarrow N_e(h) \longrightarrow f_p(h) \longrightarrow h'(f) \longrightarrow \text{изображение ионограммы}.$$

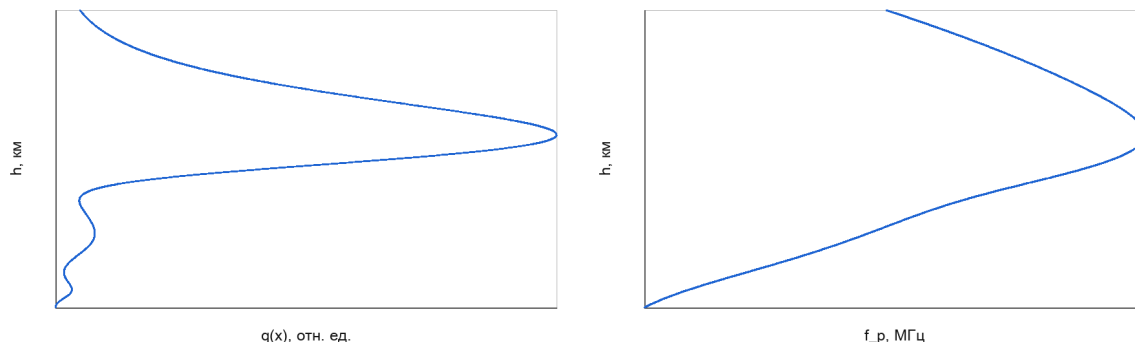


Рис. 1. Слева: высотный профиль источника $q(x)$. Справа: полученный профиль плазменной частоты $f_p(h)$.

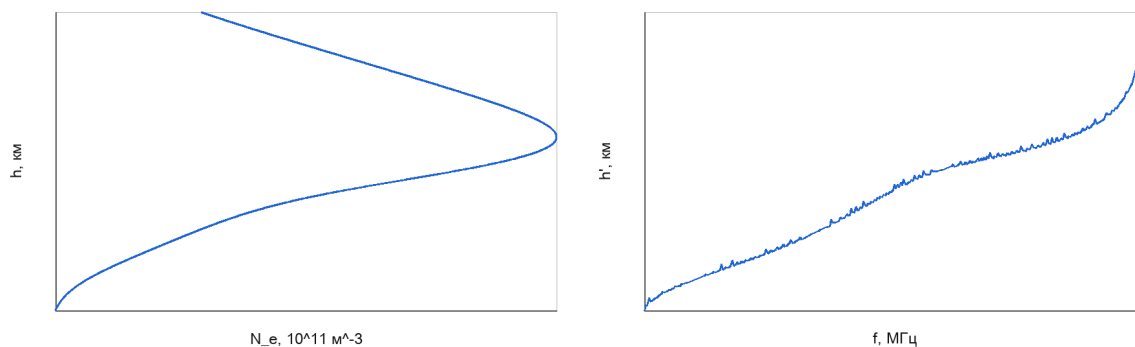


Рис. 2. Слева: профиль электронной концентрации $N_e(h)$. Справа: рассчитанная высотно-частотная характеристика $h'(f)$.

По сравнению с прямым заданием ионограммного следа такой подход сохраняет явную связь изображения с высотным профилем электронной концентрации.

Вместе с тем модель остается демонстрационной. В ней нет нестационарности, горизонтальной неоднородности, полного магнитоионного выражения показателя преломления, столкновительного поглощения, отдельной X-компоненты и самостоятельного следа спорадического слоя Es. Поэтому полученную ионограмму следует интерпретировать как контролируемый синтетический образец, а не как расчет для конкретного сеанса наблюдений.

Тем не менее именно такая упрощенная постановка полезна как промежуточный этап. Она позволяет связать параметры профиля, диагностические характеристики слоя и итоговое изображение одной вычислительной схемой. Для задач автоматического распознавания это особенно важно: можно генерировать семейства ионограмм с известной физической подложкой, варьировать уровень шума и помех, а затем проверять устойчивость алгоритмов выделения следа и оценивания f_oF2 , $hmF2$ и других параметров. Кроме того, дифференцируемость PINN-тракта делает естественным

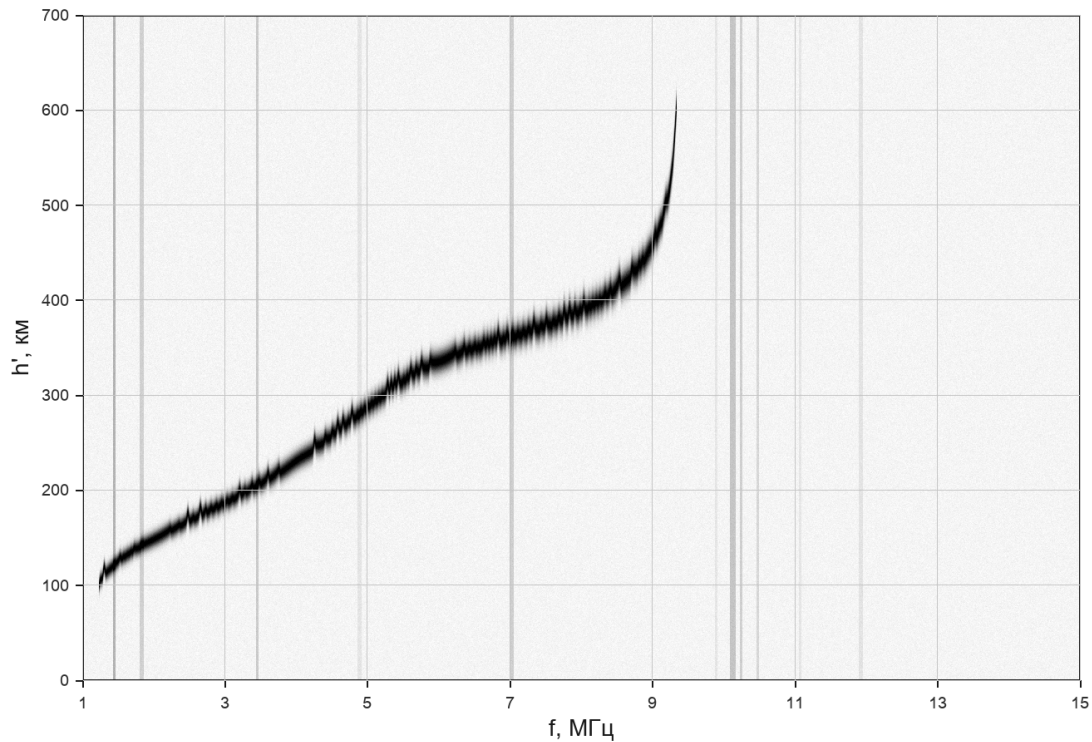


Рис. 3. Синтетическое изображение ионограммы, полученное из рассчитанной кривой $h'(f)$; высота отложена вверх, палитра инвертирована для печатного представления.

следующий шаг – включение в функционал наблюдательного слагаемого, зависящего уже не только от профиля, но и от положения следа на самой ионограмме.

На текущем этапе наиболее информативными результатами являются не итоговые полутоновые изображения, а профили $N_e(h)$, $f_p(h)$ и высотно-частотная характеристика $h'(f)$. Именно эти зависимости непосредственно отражают качество физической постановки и позволяют локализовать расхождения между моделью и ожидаемым поведением следа. Поэтому в данной работе акцент сделан на анализе промежуточных радиофизических представлений, которые затем могут быть использованы как основа для дальнейшего совершенствования синтеза изображений ионограмм.

Заключение

Разработан и проверен прототип синтеза ионограмм на основе PINN. Нейросеть используется не как черный ящик для рисования изображения, а как аппроксимация высотного профиля, ограниченного дифференциальным уравнением баланса. В пилотном эксперименте получены физически разумные масштабы максимума электронной концентрации и критической частоты слоя F2: $f_oF2 = 9.36$ МГц, $hmF2 = 340.0$ км.

Следующий этап работы – включение наблюдательного слагаемого в функционал PINN и расширение радиофизической модели до нескольких магнитоионных компонент.

Список литературы

1. РД 52.26.817–2023. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023.
2. Щирий А. О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. — 2022. — № 10.
3. Щирий А. О. Две методики измерения помех декаметрового диапазона // Научное приборостроение. — 2023. — Т. 33, № 4. — С. 72–83.
4. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. — 2019. — V. 378. — P. 686–707.
5. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 526 с.