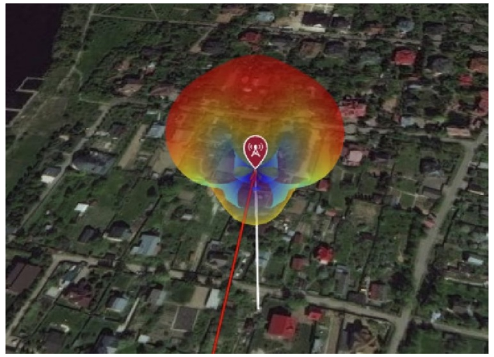
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Моделирование в инженерном деле»

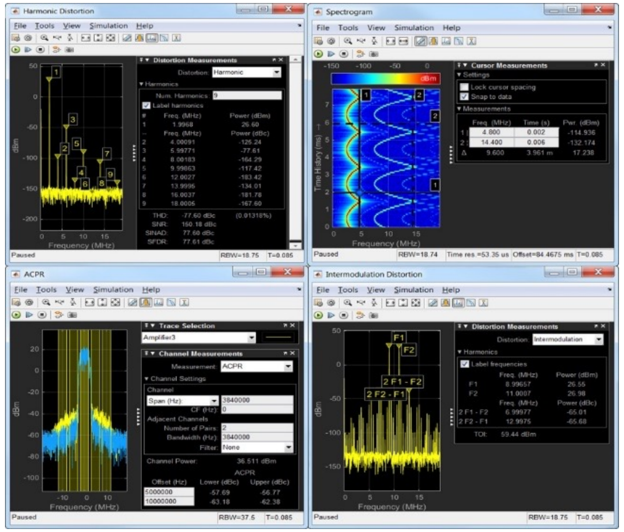
Применение нейронных сетей для учета подстилающей поверхности при моделировании распространения радиоволн

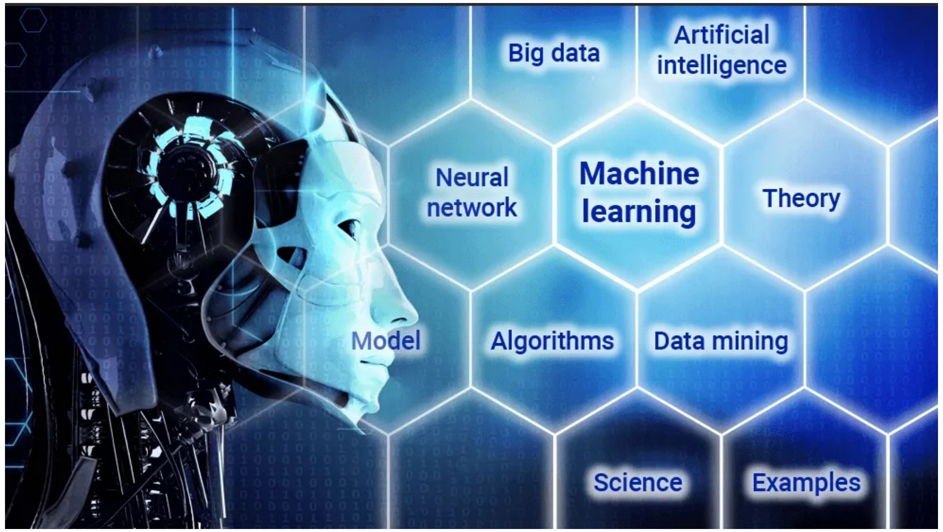
ЦИТМ Экспонента

Балакин Дмитрий

Отдел радиотехнических систем



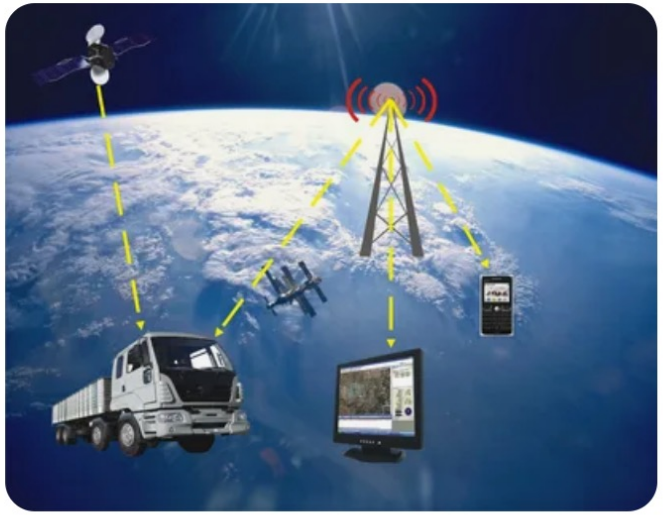




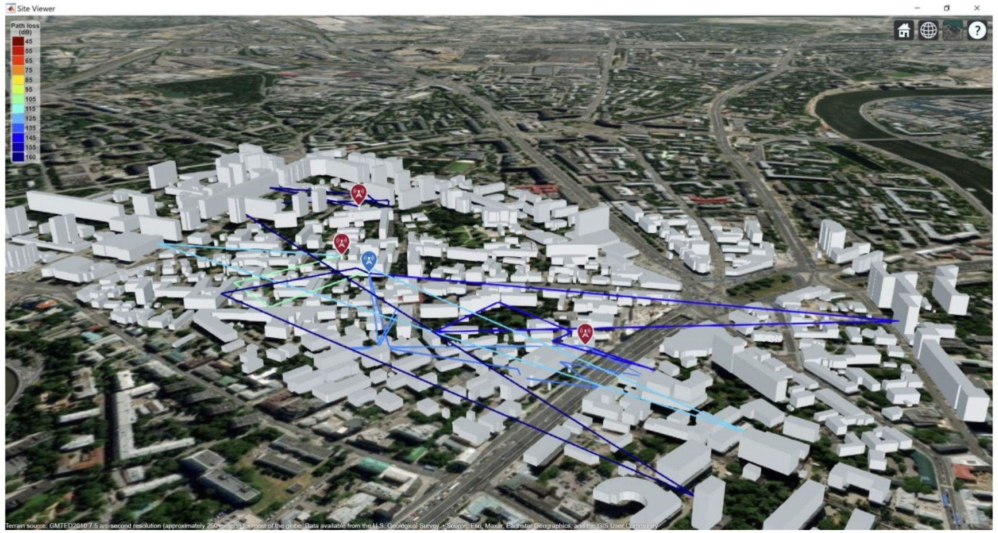
Учет подстилающей поверхности при распространении радиоволн

Радиолокация

Радионавигация



Системы связи



Где найти данные ?

Задача 1. Модель-имитатор

Задача 2. Цифровой алгоритм адаптации на базе нейронной сети

Задача 1. Модель-имитатор

Имитатор – компьютерная модель, позволяющая:

- загружать реальные географические карты местности;
- рассчитывать распространение радиоволн с учетом ПП;
- воспроизводить разнообразные реальные сценарии;
- генерировать датасет для обучения нейронной сети.

Задача 1. Модель-имитатор

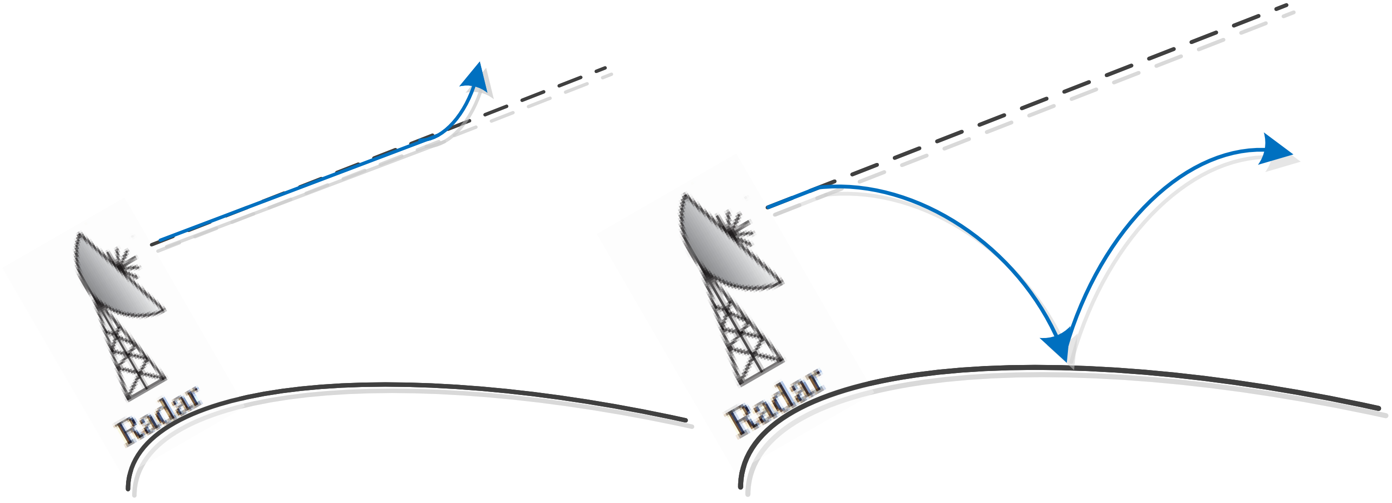





Задача 1. Модель-имитатор

- **Этап 1. Разработка модели морской поверхности**
- **Этап 2. Разработка метода моделирования распространения радиоволн**
- **Этап 3. Интеграция этапа 1 и этапа 2**

Задача 1. Модель-имитатор
Этап 1. Разработка модели морской поверхности



Субрефракция *Сверхрефракция*

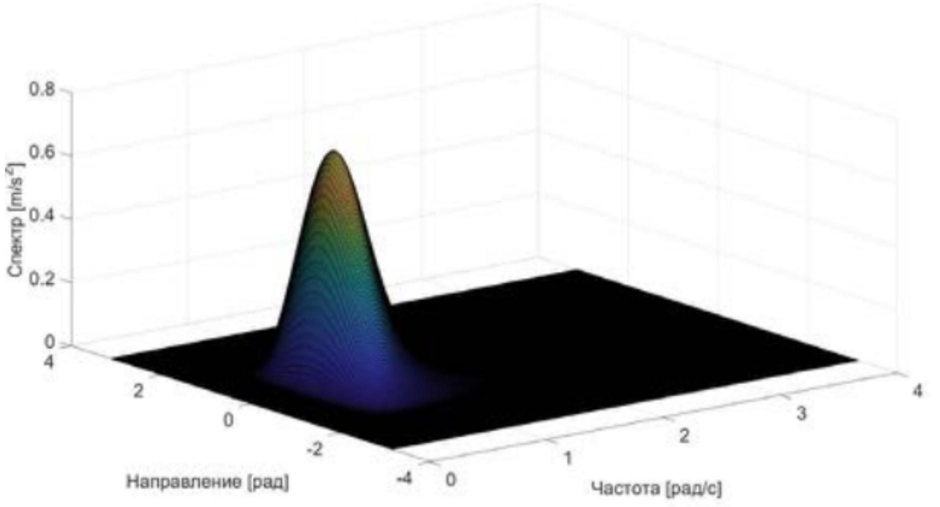
- Приповерхностные волноводы
- Приподнятые волноводы
- Волноводы испарений

- Спектральная модель JONSWAP
- Метод Миллера-Брауна
- Метод затенения

Спектральная модель JONSWAP

1. Задаётся спектр волнения моря

$$S(w,\theta_d) = a_s \frac{g^2}{w^5} exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{w_m}{w}\right)^4\right] \gamma^{exp\left[\frac{-(w-w_m)^2}{2\sigma^2 w_m^2}\right]} G(\theta_d)$$

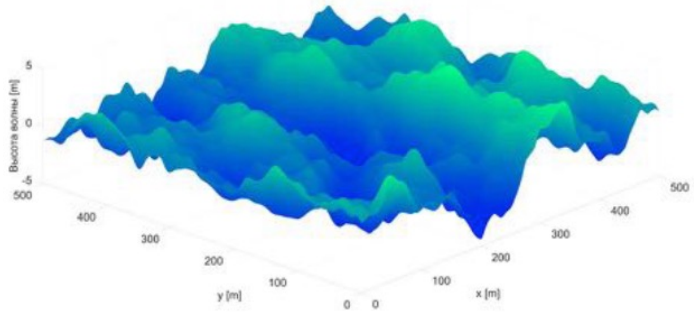


2. По спектру осуществляем переход в пространственную область

$$\eta(x,y,t) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} \zeta_{ij} \cos\left[k_{ij}\left((x+V_x t)\cos\theta_j + (y+V_y t)\sin\theta\right) - w_{ij}t + \beta_{ij}\right]$$

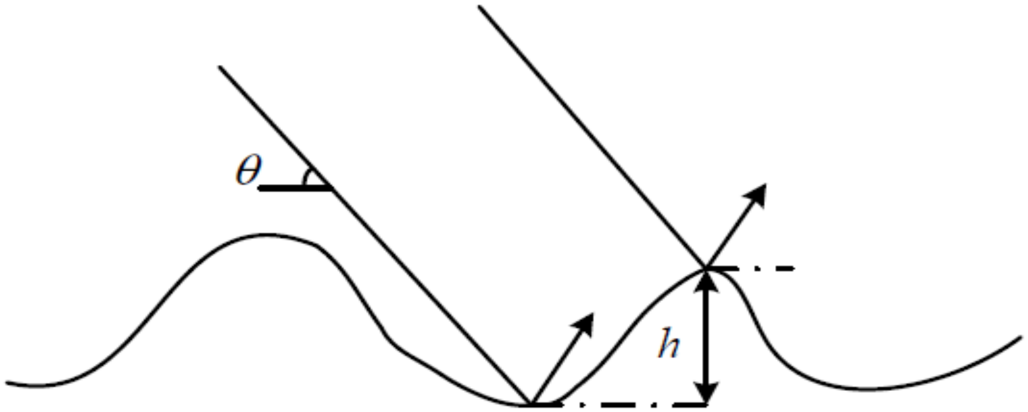
Случайная фаза $w_{ij} = \frac{(w_i+w_{i+1})}{2} - \frac{1}{2}\Delta w + \frac{(j-1+RAN(i,j))\Delta w}{n},$

Амплитуда $\zeta_{ij} = \sqrt{2S(w_i,\theta_j)\Delta w \Delta\theta}$



Метод Миллера-Брауна

- **Основное предложение метода состоит в том, что поверхность описывается ПВ амплитуды волн, зависящей от скорости ветра и определяющей разность высот поверхности моря. В результате имеющейся разницы высот образуется разность фаз между отраженными лучами от гребня волны и от «низины» волны, и в результате интерференции таких лучей может происходить частичное поглощение ЭМП.**
- **По имеющейся ПВ поверхности аналитически получают рэлеевский коэффициент отражения (ослабления)**



$$P_1(\zeta) = \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}} h} e^{-\frac{\zeta^2}{8h^2}} K_0\left(\frac{\zeta^2}{8h^2}\right)$$ **- ПВ**

$$\rho_1 = e^{-\frac{1}{2}\gamma^2} I_0\left(\frac{1}{2}\gamma^2\right)$$

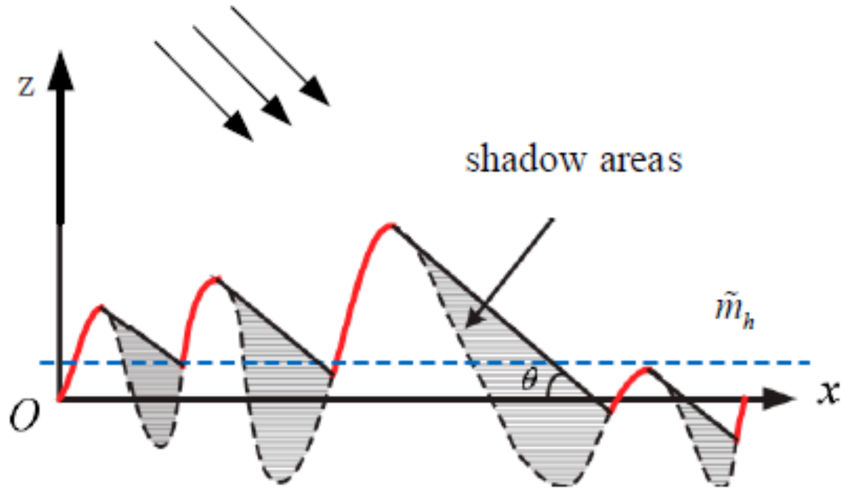
коэффициент отражения, где

$$\gamma = 2kh\sin\theta,$$

Θ – **угол скольжения ЭМВ**

Метод затенения

- **Данная модель предполагает учёт влияния скрытых поверхностей на моделируемую картину поверхности моря.**
- **Предлагается дополнить ПВ высот метода Миллера-Брауна до двумерной ПВ с учётом случайного распределения углов падения.**
- **Из данного предположения находится коэффициент ослабления.**



$$\rho_2 = \exp\left(-2ik\tilde{m}_h \sin\theta - (2ik\sin\theta)^2/2\right)$$

Задача 1. Модель-имитатор.
Этап 2. Разработка метода моделирования распространения радиоволн

- Геометрическая теория дифракции
- Метод конечных элементов
- Метод конечных разностей
- Метод параболического волнового уравнения

Теория

$$rot\,\dot{\mathbf{H}} = j\omega\dot{\mathbf{D}} + \sigma\dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{J}}_{cm}$$

$$rot\,\dot{\mathbf{E}} = -j\omega\dot{\mathbf{B}}$$

$$div\,\dot{\mathbf{D}} = \dot{\rho}$$

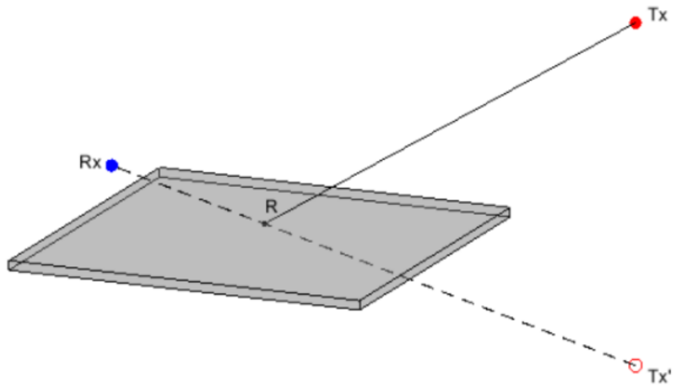
$$div\,\dot{\mathbf{B}} = 0$$

$$\dot{\mathbf{D}} = \varepsilon_a\dot{\mathbf{E}}$$

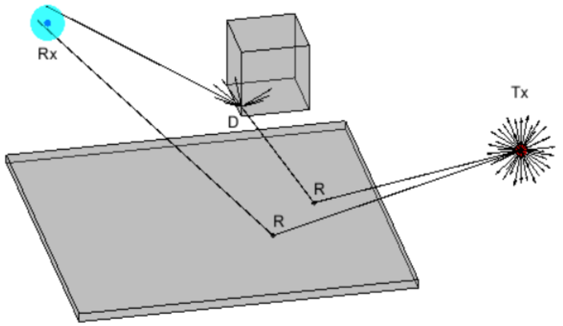
$$\dot{\mathbf{B}} = \mu_a\dot{\mathbf{H}}$$

$$\Longrightarrow \quad \nabla^2\dot{\mathbf{E}} + \omega^2\mu_a\varepsilon_a\dot{\mathbf{E}} = 0$$

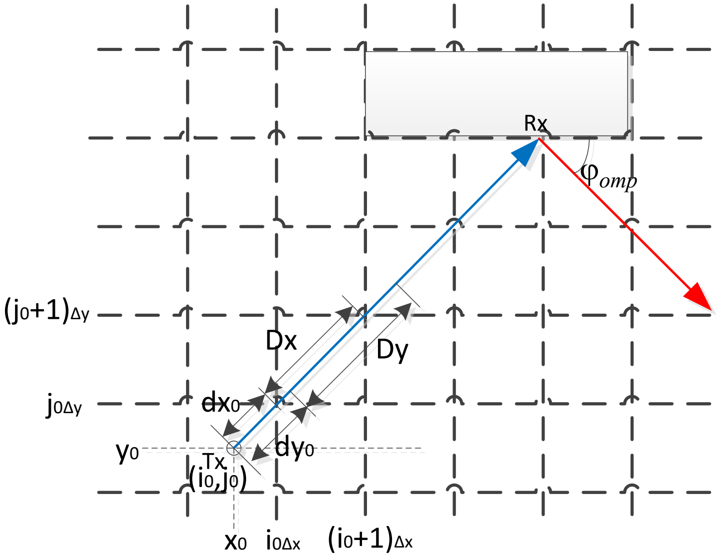
Геометрическая теория дифракции

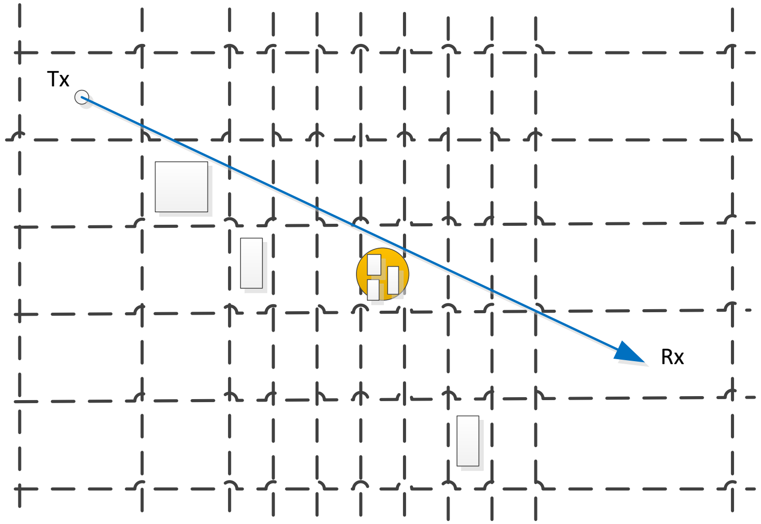


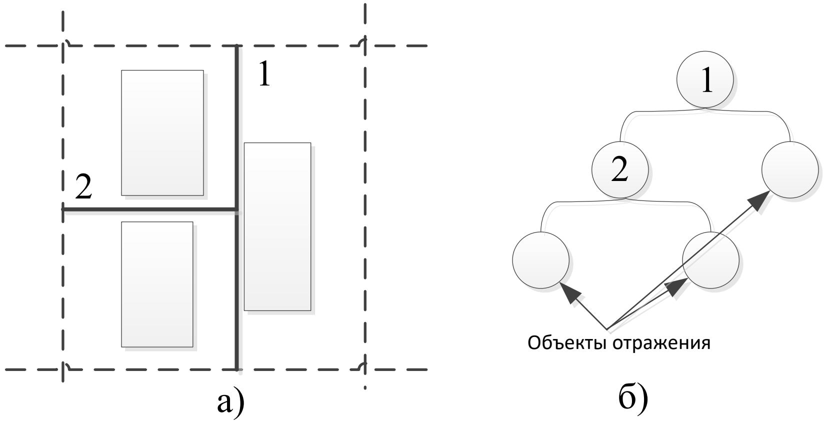
Метод зеркального отображения



Учет отражения на клине







Результат разбиения по SAH: а) – поверхность, б) – дерево

Метод конечных элементов

$$\tilde{\mathbf{E}} = \sum_{n=1}^{N} c_n \mathbf{w}_n$$

$$\sum_{n=1}^{N} c_n \left(\begin{array}{l} \int\limits_{\Omega_q} (\nabla \times \mathbf{w}_n) \cdot (\nabla \times \mathbf{w}_m) d\Omega + \int\limits_{S_q} (\nabla \times \mathbf{w}_n) \times \mathbf{w}_m dS + \\ - \int\limits_{\Omega_q} \gamma^2 \cdot \mathbf{w}_n \cdot \mathbf{w}_m d\Omega \end{array} \right) = - \int\limits_{\Omega_q} j\omega\mu_a \dot{\mathbf{J}}_{cm} \cdot \mathbf{w}_m d\Omega_q$$

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}$$

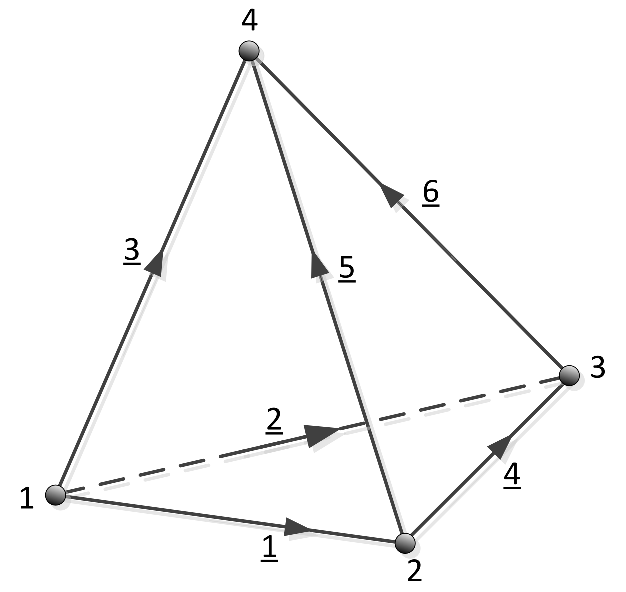
$$\mathbf{A} = \mathbf{R} + \mathbf{T} + \mathbf{S}$$

$$\mathbf{R} = R_{n,m} = \int\limits_{\Omega} \left(\nabla \times \mathbf{w}_{n,q}\right) \cdot \left(\nabla \times \mathbf{w}_{m,q}\right) d\Omega$$

$$\mathbf{T} = T_{n,m} = -\int\limits_{\Omega_q} \gamma^2 \cdot \mathbf{w}_{n,q} \cdot \mathbf{w}_{m,q} d\Omega$$

$$\mathbf{S} = S_{n,m} = \int\limits_{S_q} \left(\nabla \times \mathbf{w}_{n,q}\right) \times \mathbf{w}_{m,q} dS$$

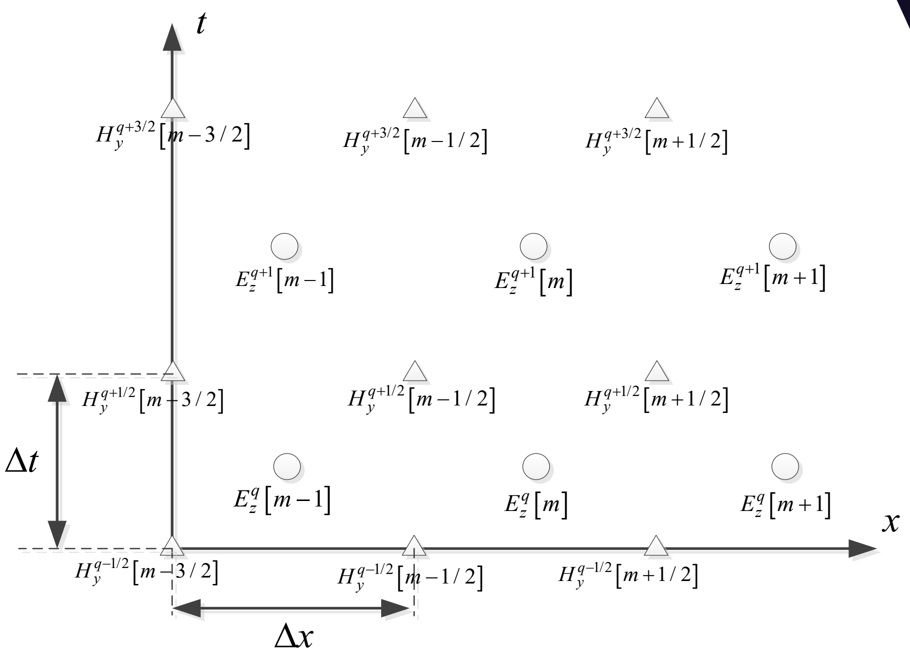
$$\mathbf{B} = B_n = -\int\limits_{\Omega_q} j\omega\mu_a \dot{\mathbf{J}}_{cm} \cdot \mathbf{w}_{n,q} d\Omega$$



Метод конечных разностей

$$\begin{cases} -\mu\dfrac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = \nabla\times\boldsymbol{E} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{e}_x & \boldsymbol{e}_y & \boldsymbol{e}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{vmatrix} = -\boldsymbol{e}_x\dfrac{\partial E_z}{\partial x} \\ \varepsilon\dfrac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \nabla\times\boldsymbol{H} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{e}_x & \boldsymbol{e}_y & \boldsymbol{e}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & H_y & 0 \end{vmatrix} = \boldsymbol{e}_z\dfrac{\partial H_y}{\partial x} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_z(x,t) = E_z(m\Delta x, q\Delta t) = E_z^q[m] \\ H_y(x,t) = H_y(m\Delta x, q\Delta t) = H_z^q[m] \end{cases}$$

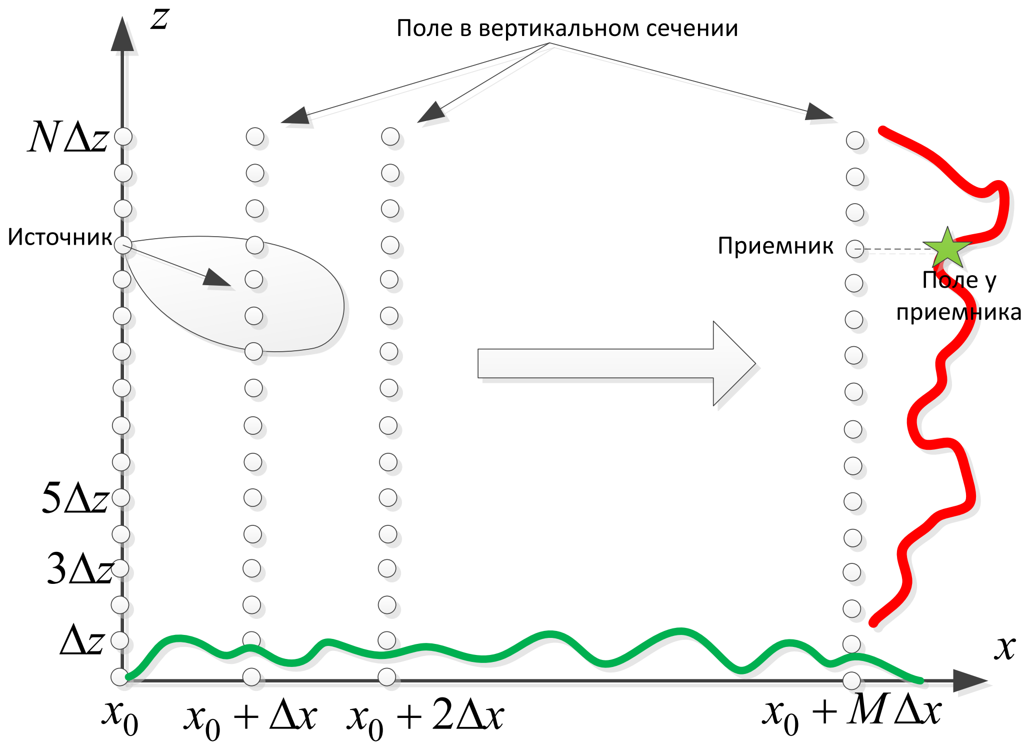


$$\mu\frac{H_y^{q+1/2}[m+1/2]-H_y^{q-1/2}[m+1/2]}{\Delta t} = \frac{E_z^q[m+1]-E_z^q[m]}{\Delta x}$$

$$H_y^{q+1/2}[m+1/2] = H_y^{q-1/2}[m+1/2] + \frac{\Delta t}{\mu\Delta x}\left(E_z^q[m+1]-E_z^q[m]\right)$$

$$\begin{cases} \varepsilon\dfrac{E_z^{q+1}[m]-E_y^q[m]}{\Delta t} = \dfrac{H_y^{q+1/2}[m+1/2]-H_y^{q+1/2}[m-1/2]}{\Delta x} \\ E_z^{q+1}[m] = E_z^q[m] + \dfrac{\Delta t}{\varepsilon\Delta x}\left(H_y^{q+1/2}[m+1/2]-H_y^{q+1/2}[m-1/2]\right) \end{cases}$$

Метод параболического волнового уравнения



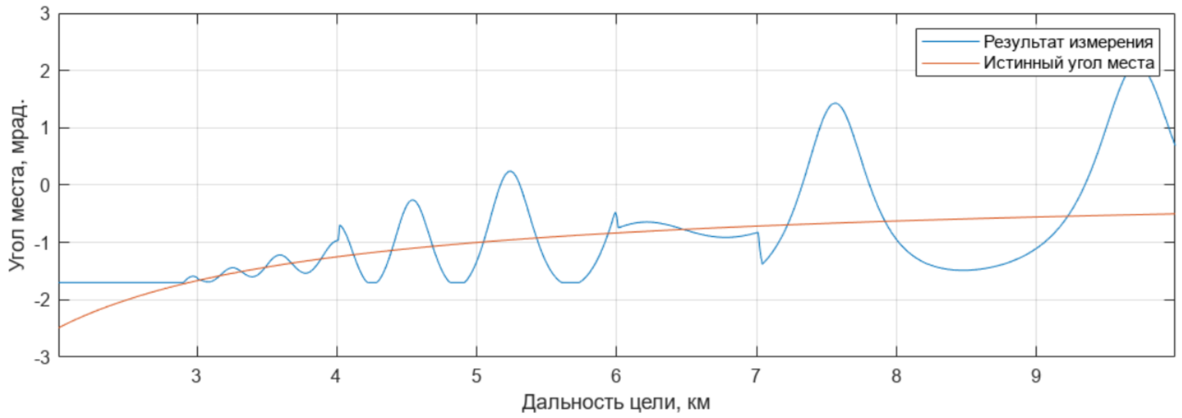
$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k_0^2 n(x,z)^2\right)\psi(x,z)=0$$

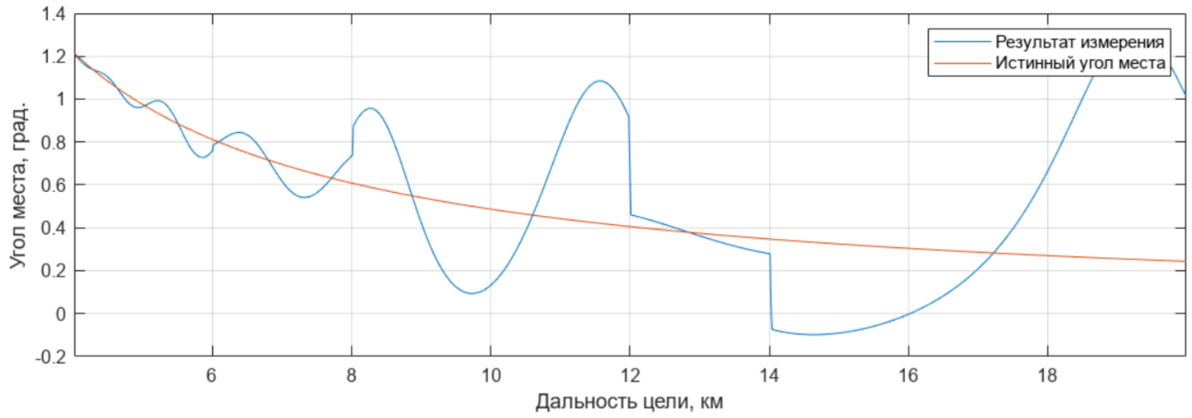
$$\left(\frac{\partial}{\partial x}+jk_0(1-Q)\right)\left(\frac{\partial}{\partial x}+jk_0(1+Q)\right)u(x,z)=0$$

$$u(x+\Delta x,z)=\exp\left(\frac{jk_0\Delta x}{2}\left[n^2\left(x+\frac{\Delta x}{2},z\right)-1\right]\right)\left(F^{-1}\left\{\exp\left(-\frac{j\Delta x f_z^2}{2k_0}\right)F\{u(x,z)\}\right\}\right)$$

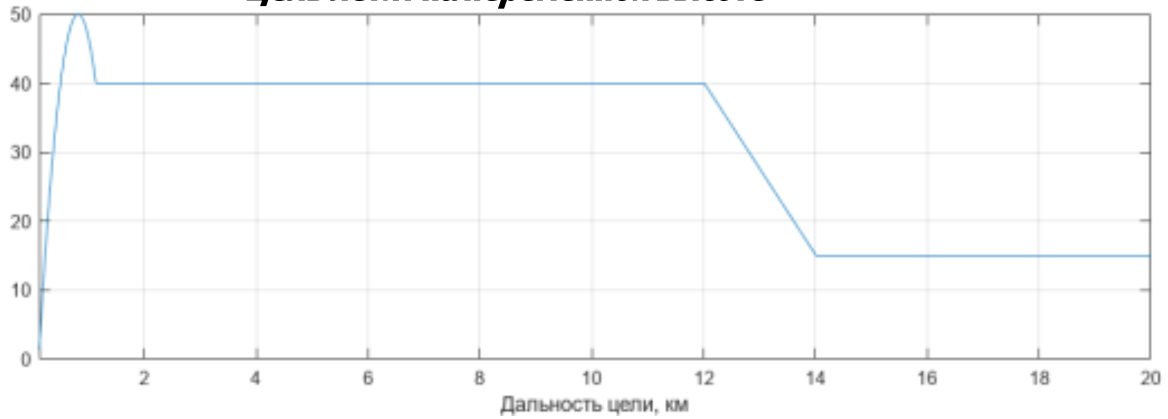
Задача 2. Цифровой алгоритм адаптации на базе нейронной сети

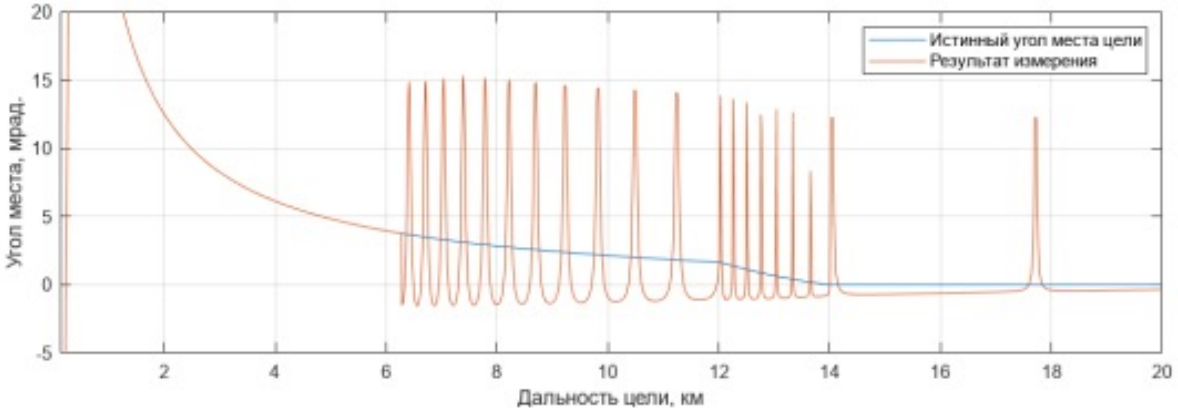
Цель летит на постоянной высоте



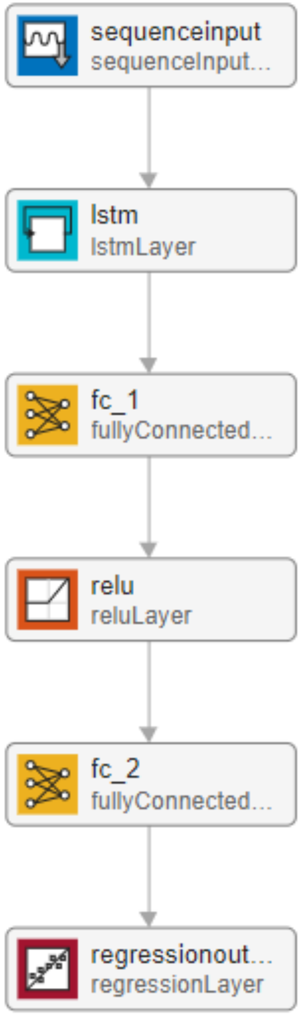


Цель летит на переменной высоте





Результаты работы



- **Загрузка последовательности**
- **Слой долговременной кратковременной памяти (LSTM) для рекуррентной нейронной сети (RNN)**
- **Полносвязный слой умножает входные данные на матрицу весов, а затем добавляет вектор смещения**
- **Слой ReLU выполняет пороговую операцию для каждого элемента ввода, где любое значение меньше нуля устанавливается равным нулю Метод Миллера-Брауна**
- **Слой регрессии вычисляет потерю полусреднеквадратичной ошибки для задач регрессии**

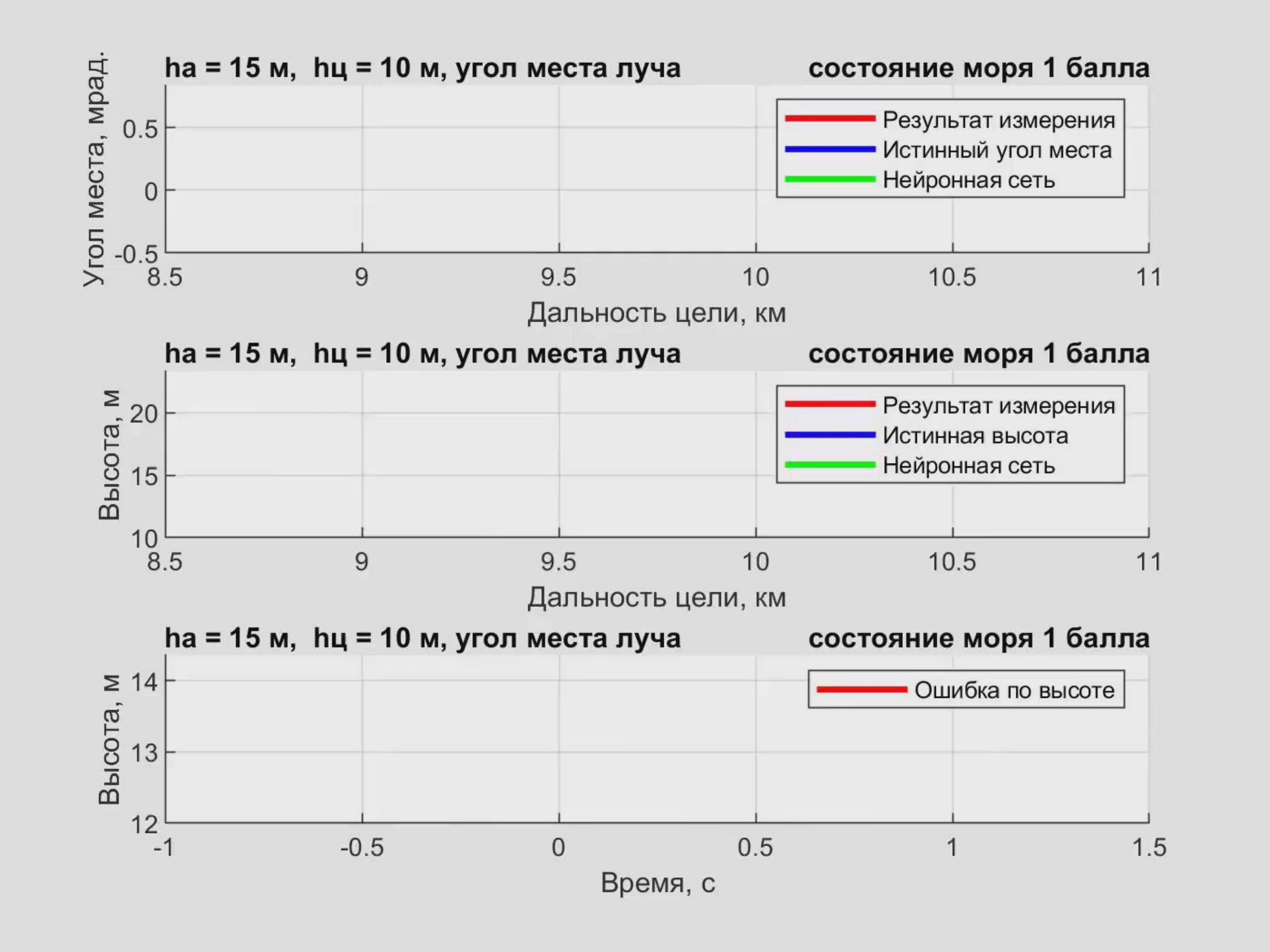
Результаты работы

Цель летит на постоянной высоте

Высота антенны: 15м

Высота цели: 10м, 20м, 30м.

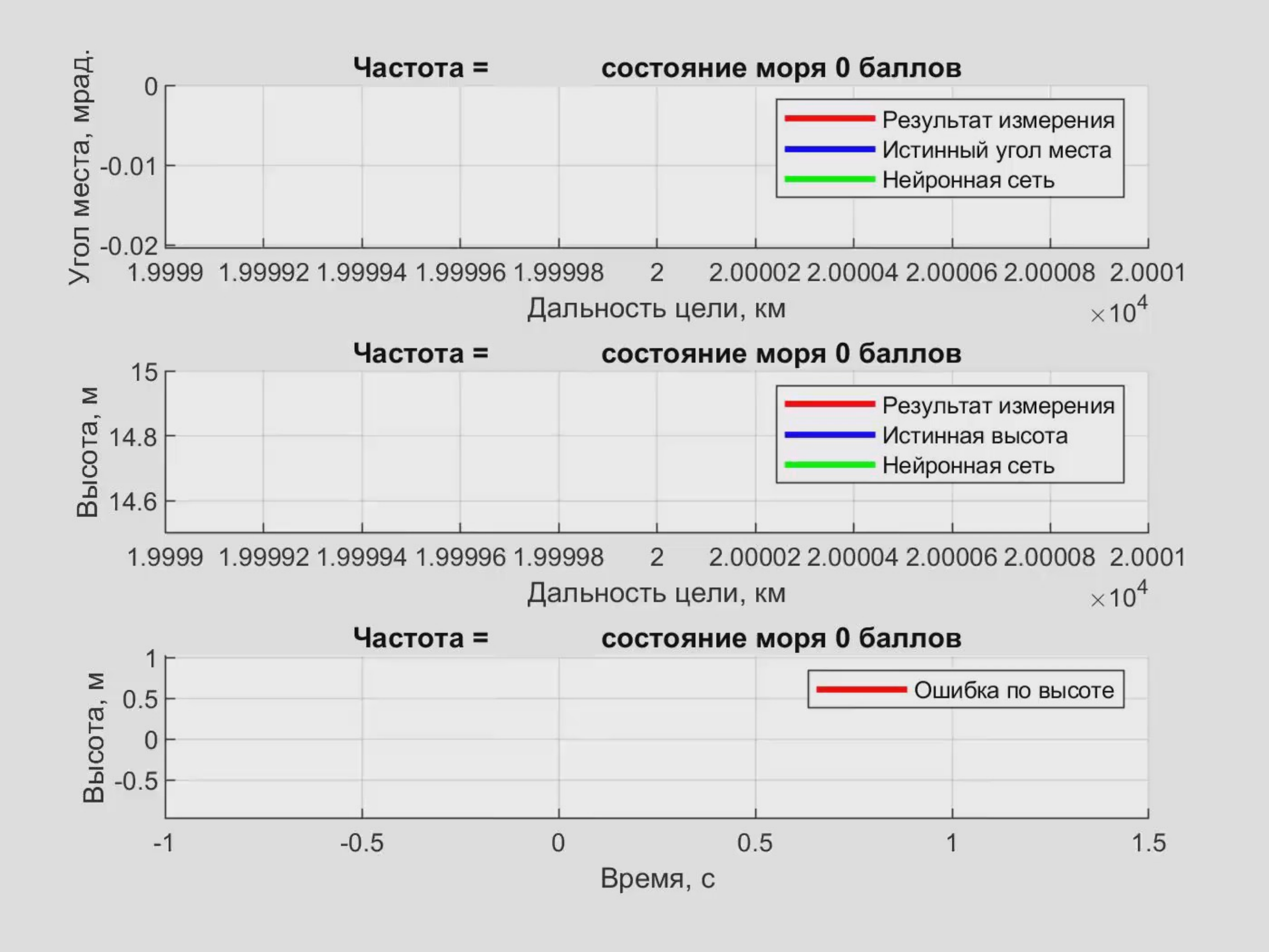
Балльность моря: 0 - 6



Результаты работы

Цель летит на переменной высоте

Балльность моря: 0 - 6



Заключение

- Идет этап разработки Модель-имитатор
- Нейронная сеть верифицирована и показала свою эффективность

Спасибо за внимание