



ЭКСПОНЕНТА

ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ



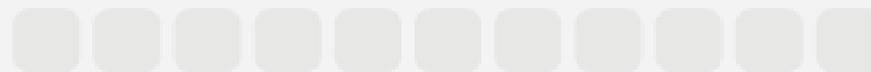
Моделирование радиолокационных систем в среде Engee

Балакин Дмитрий

Вебинар

17 декабря 2025





Мы сегодня рассмотрим...

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 



Мы сделаем на практике...

Модель из базовых радиолокационных блоков



Алгоритмы пеленгации



Алгоритмы ФДН антенной решетки



Модель автомобильного радара

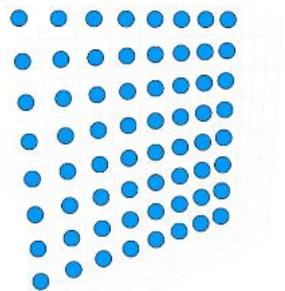




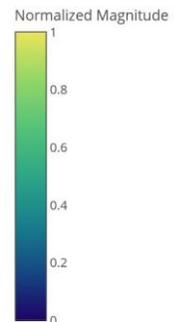
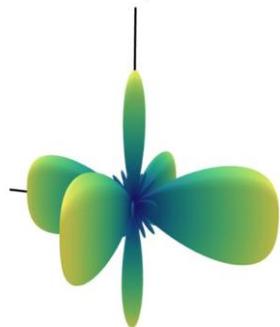
Инструменты

EngeePhased

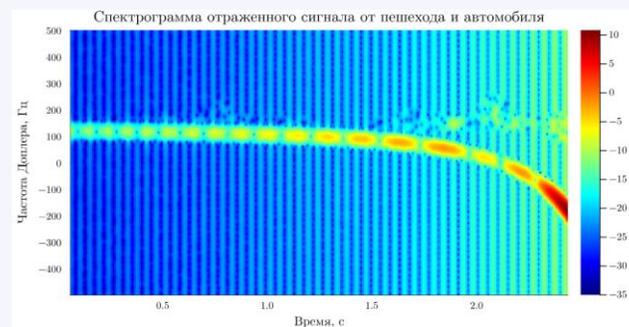
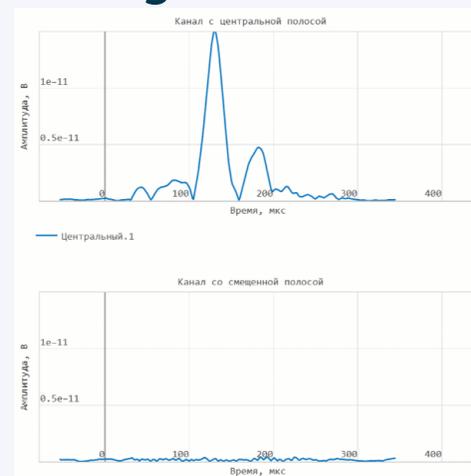
Прямоугольная антенная решетка



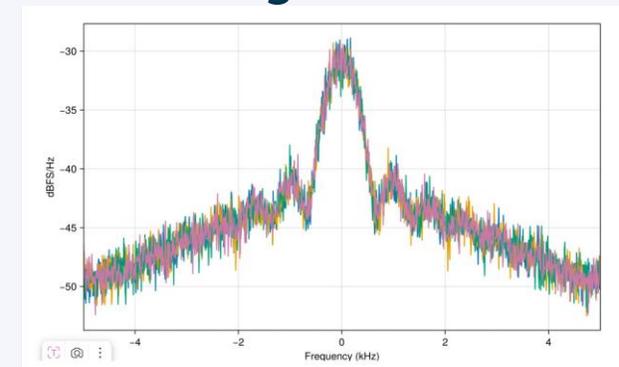
3D Response Pattern



EngeeRadar



EngeeDSP





Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

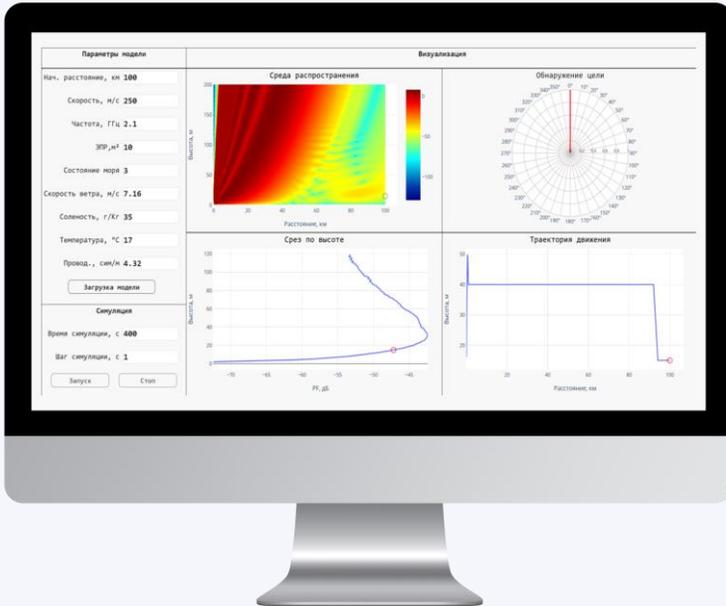
Подведем итоги 

Парадигмы разработки РЛС

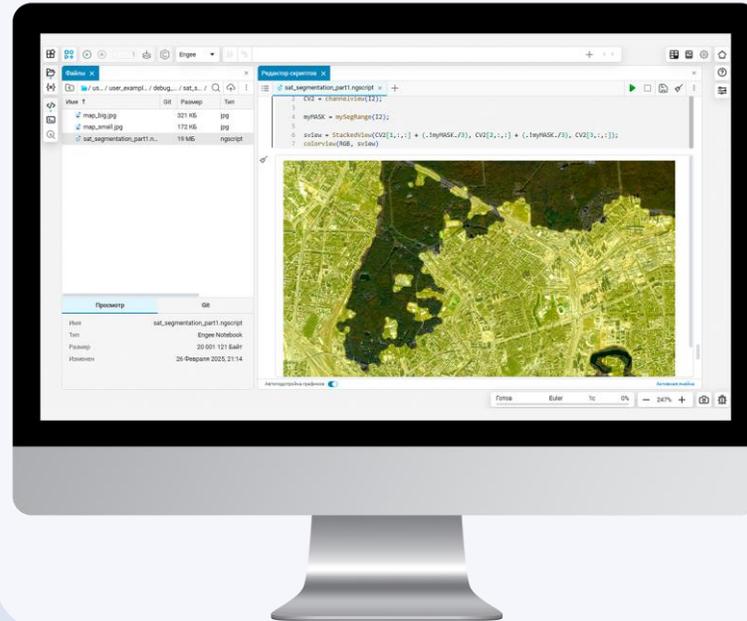
Введение в моделирование РЛС в Engage



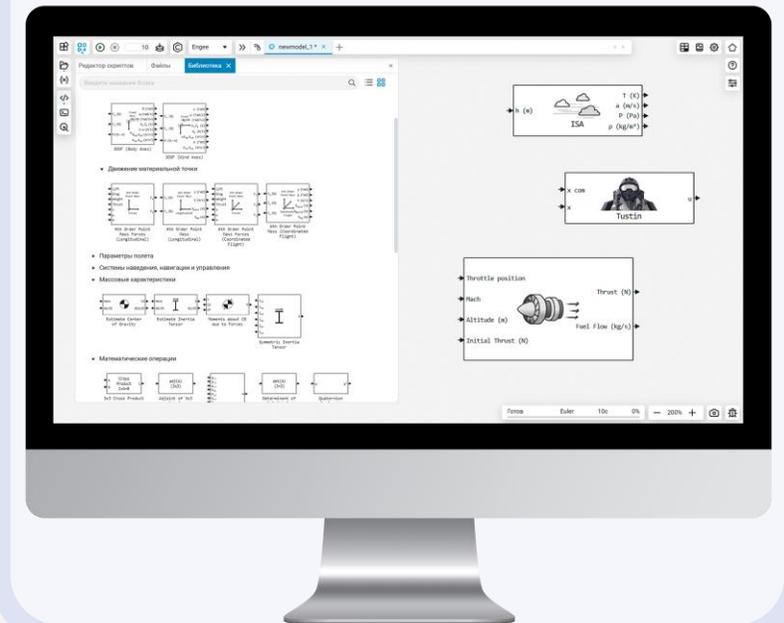
APP-разработка



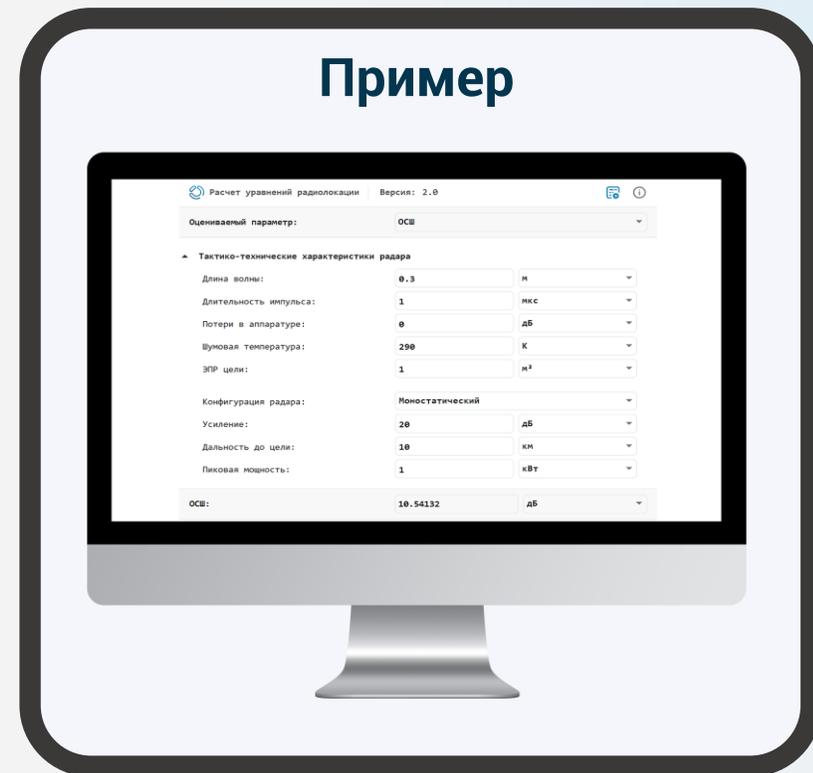
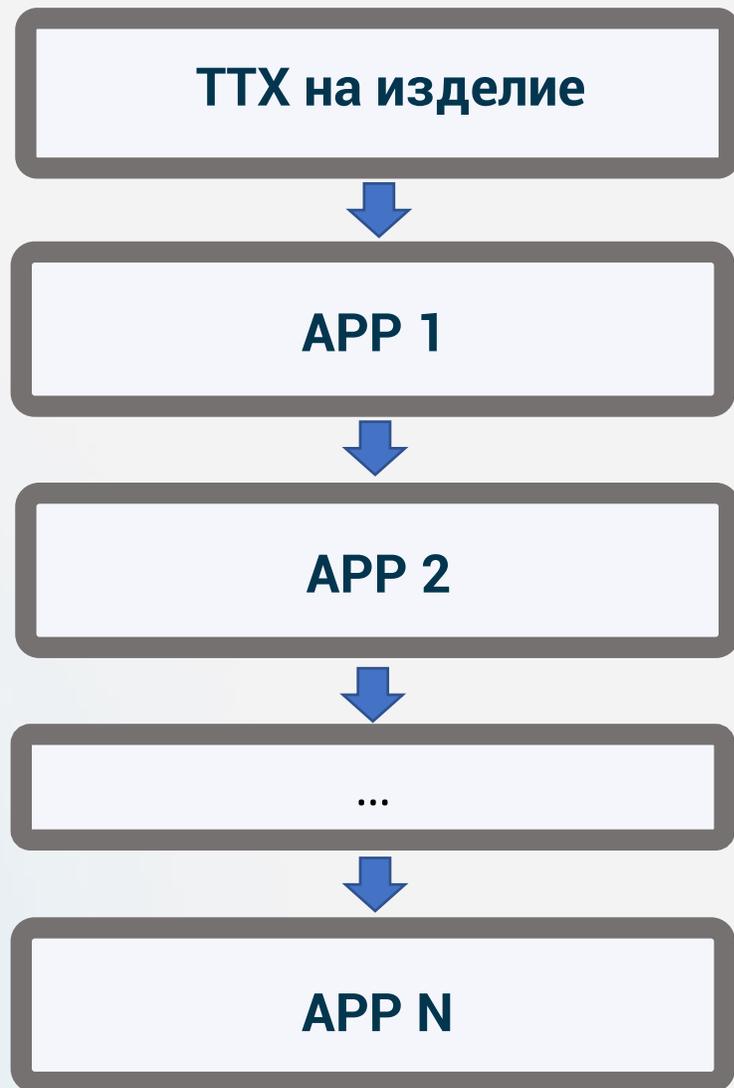
Скрипт-разработка



Модельно-ориентированное проектирование



APP-разработка



Расчет уравнения радиолокации

Введение в моделирование РЛС в Engage



Hello, World! в радарях

Расчет уравнений радиолокации | Версия: 2.0

Оцениваемый параметр: **Дальность**

▲ Тактико-технические характеристики радара

Длина волны: **Дальность**

Длительность импульса: **Дальность**

Потери в аппаратуре: **0** дБ

Шумовая температура: **290** К

ЭПР цели: **1** м²

Конфигурация радара: **Моностатический**

Усиление: **20** дБ

Пиковая мощность: **1** кВт

ОСШ: **10** дБ

▲ Параметры обнаружения для расчета ОСШ

Вероятность правильного обнаружения: **0.8102924**

Вероятность ложной тревоги: **0.001**

Количество импульсов накопления: **1**

Модель флуктуации ЭПР цели: **0**

Дальность действия РЛС: **17.76918** км

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s (\text{SNR}) L} \right)^{1/4}$$

$$P_t = \frac{(4\pi)^3 k T_s (\text{SNR}) R_{\max}^4 L}{\tau G^2 \lambda^2 \sigma}$$

$$\text{SNR} = \frac{P_t \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s R_{\max}^4 L}$$

Код расчета

```
1 # Engage-код
2 # Сгенерировано в Engage версии 25.11.2-N1
3 # Сгенерировано в 2025-12-04 17:53:56.455
4
5 # Все значения представлены в системных единицах
6
7 wavelen::Float64 = 0.89 # Длина волны (м)
8 pwidth::Float64 = 1.0e-6 # Длительность импульса (с)
9 sysloss::Float64 = 0.0 # Системные потери (дБ)
10 noisetemp::Float64 = 290.0 # Шумовая температура (К)
11 rcs::Float64 = 1.0 # ЭПР, м^2
12 gain::Float64 = 20.0 # Усиление антенны (дБ)
13 pkpow::Float64 = 1000.0 # Пиковая мощность передатчика (Вт)
14 snr = shnidman(0.8102924, 0.001, 1.0, 0) # ОСШ (дБ)
15 tgttrng = radareqrng(wavelen, snr, pkpow, pwidth,
16                     RCS = rcs, Gain = gain,
17                     Loss = sysloss, Ts = noisetemp)
```



ПАРАМЕТРЫ ТОПОЛОГИЯ ДН-ЗД ДН-2Д ДИСКРЕТНОСТЬ ФАЗЫ ЗС

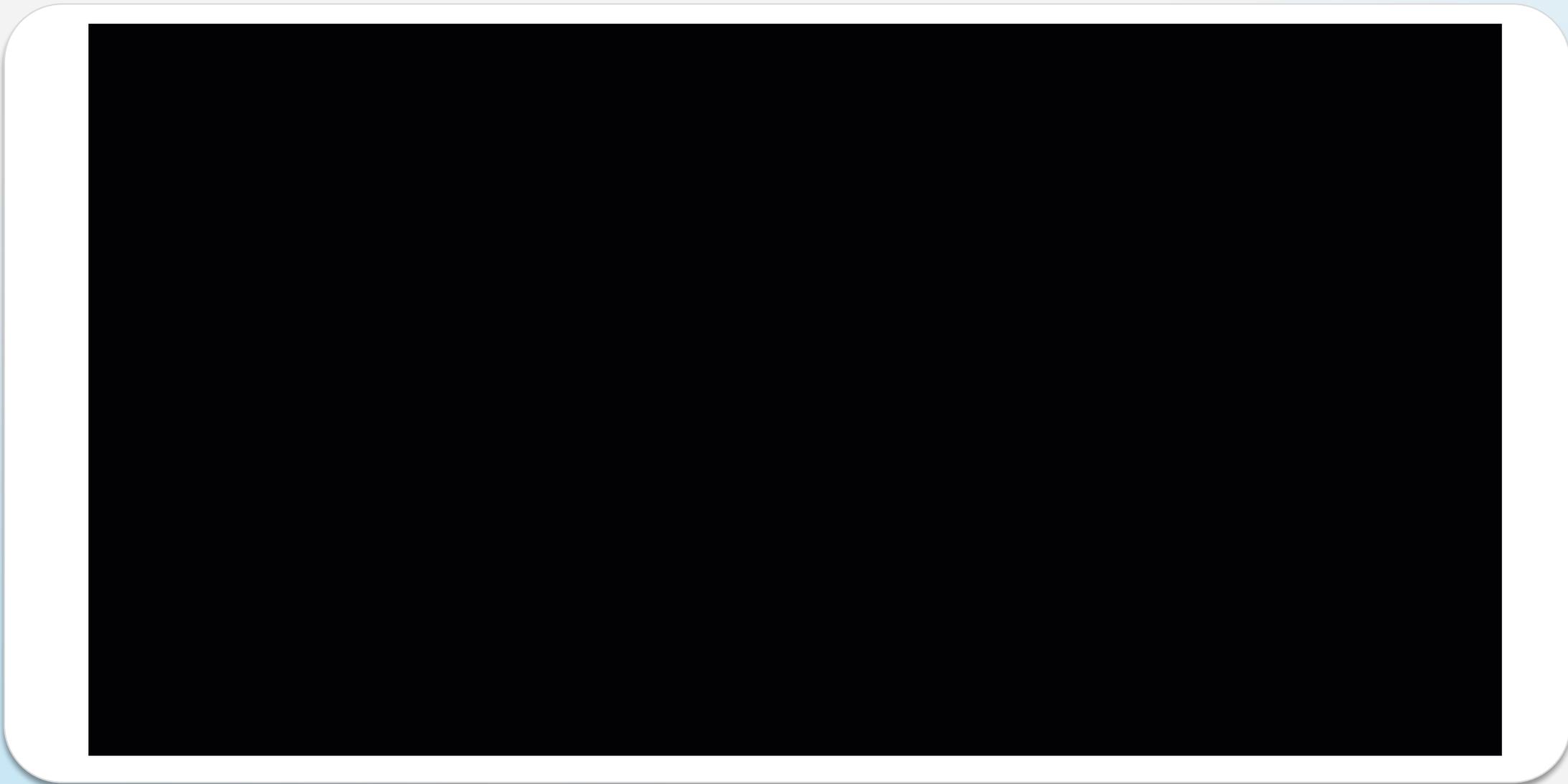
Параметры геометрии АФАР	
Тип топологии АФАР	Прямоугольная
Тип сетки прямоугольной АФАР	Прямоугольная
Тип ДН антенного элемента	Изотропная
Несущая частота	3 ГГц
Направление луча по азимуту	0 градусы
направление луча по углу места	0 градусы
Число излучателей по горизонтали	4 шт.
Число излучателей по вертикали	8 шт.

Модуль АЦП	
Частота дискретизации	10 МГц
Количество каналов	2 шт.
Разрядность	12 шт.
Динамический диапазон	60 дБ
СКО напряжение шума	3 дБ

Приемно-передающий модуль	
Полоса частот ППМ	3 МГц
Коэффициент шума	3 дБ
Дискретность изменения фазы	2 бит
Дискретность изменения амплитуды	6 бит
Импульсная мощность передатчика	30 Вт
Шумовая температура	293 К
Потери в тракте	0 дБ

Параметры зондирующего сигнала	
Тип зондирующего сигнала	Непрерывный
Полоса импульса:	1 МГц
Частота следования импульсов:	10 кГц

Расчет АФАР



Модельно-ориентированное проектирование в радарх

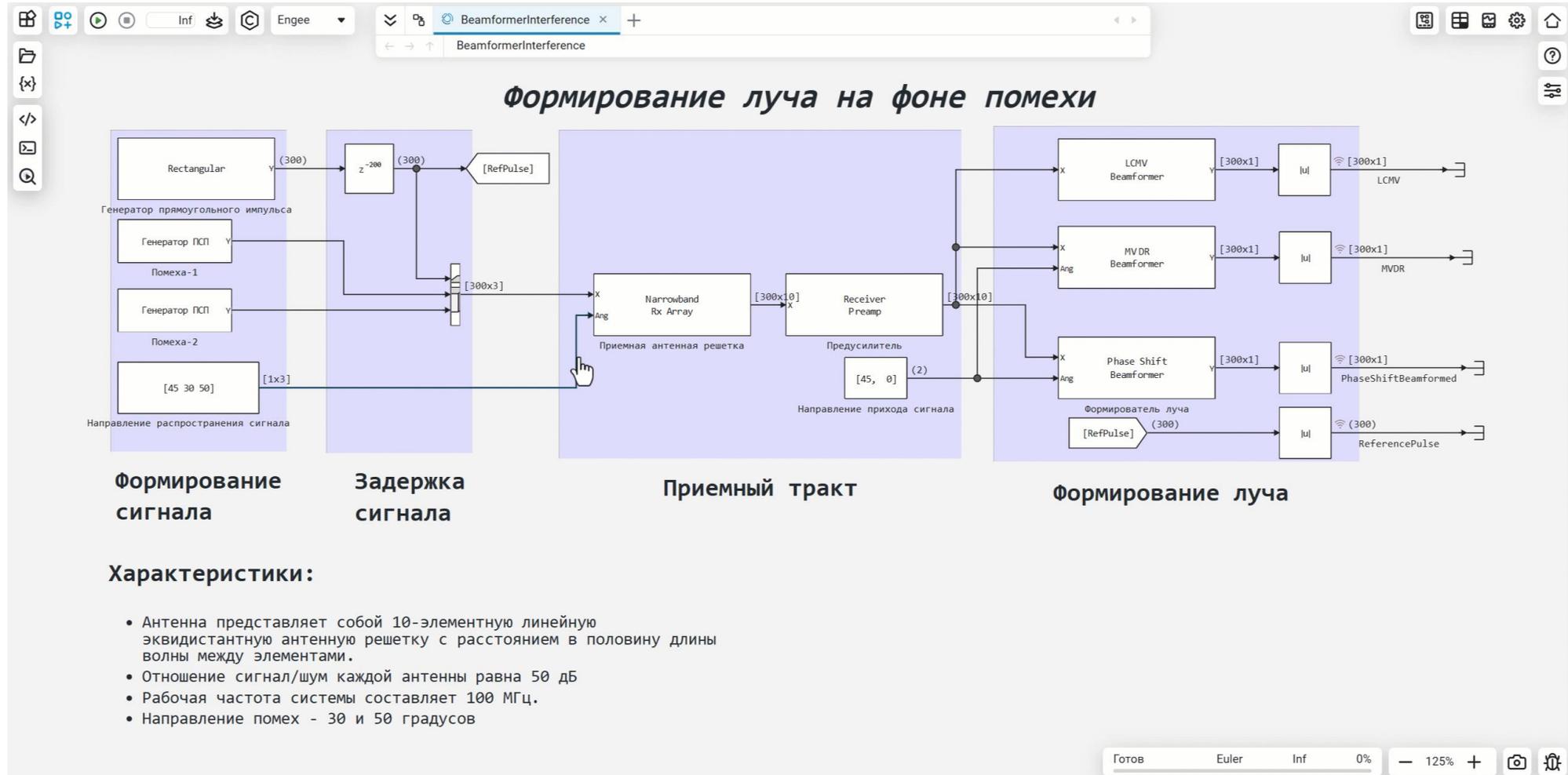
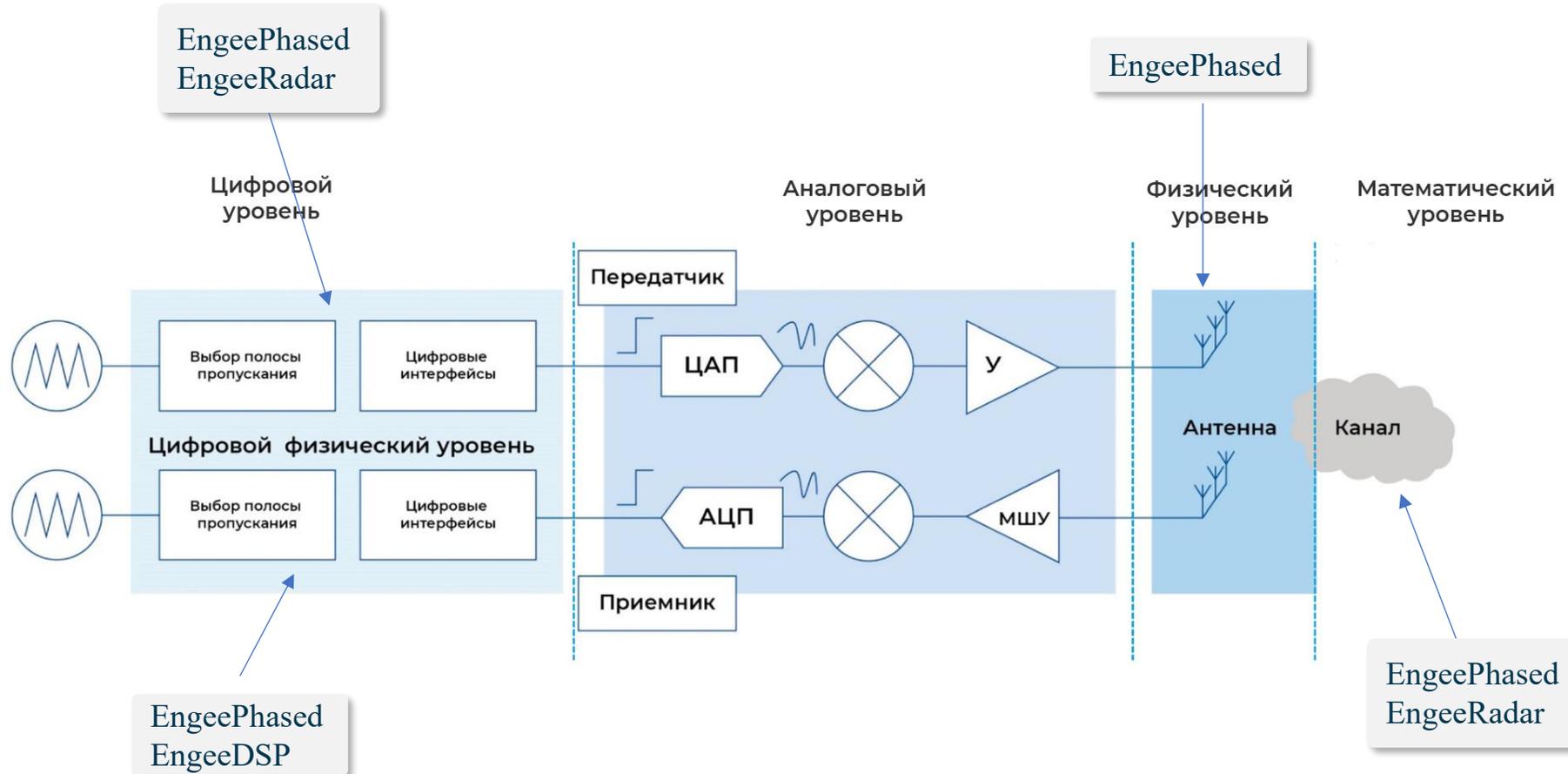


Схема построения РТС





Практика на МОП

Модель из базовых
радиолокационных блоков



Алгоритмы пеленгации



Алгоритмы ФДН антенной решетки



Модель автомобильного
радар





Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 

Генераторы сигнала



Типовые ЗС РЛС

Непрерывные

Немодулированные

Модулированные

АМ

ЧМ

ФМ

Линейный FMCW

Нелинейный FMCW

Импульсные

Немодулированные

Модулированные

Внутриимпульсная

Межимпульсная

ЧМ

ФМ

ЧМ

ФМ

Линейный ЧМ

Нелинейный ЧМ

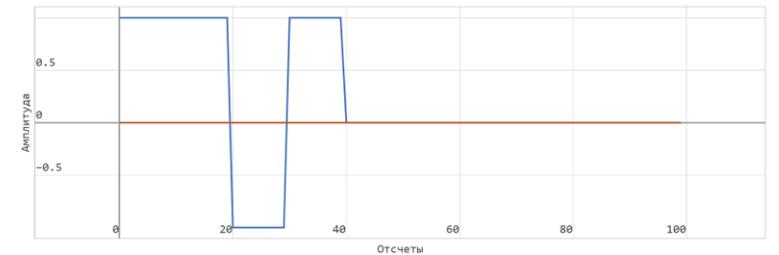
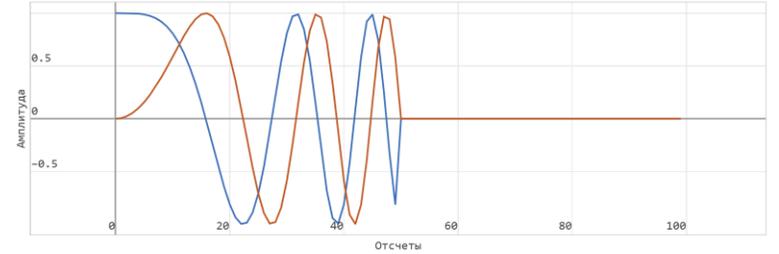
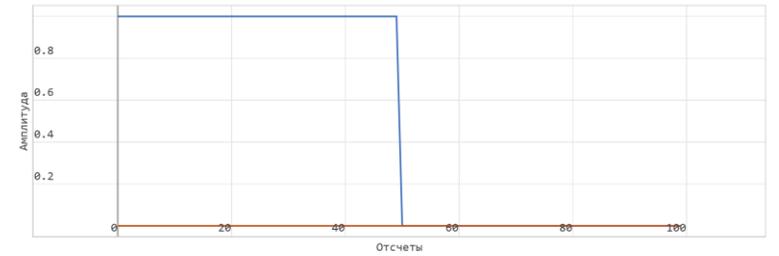
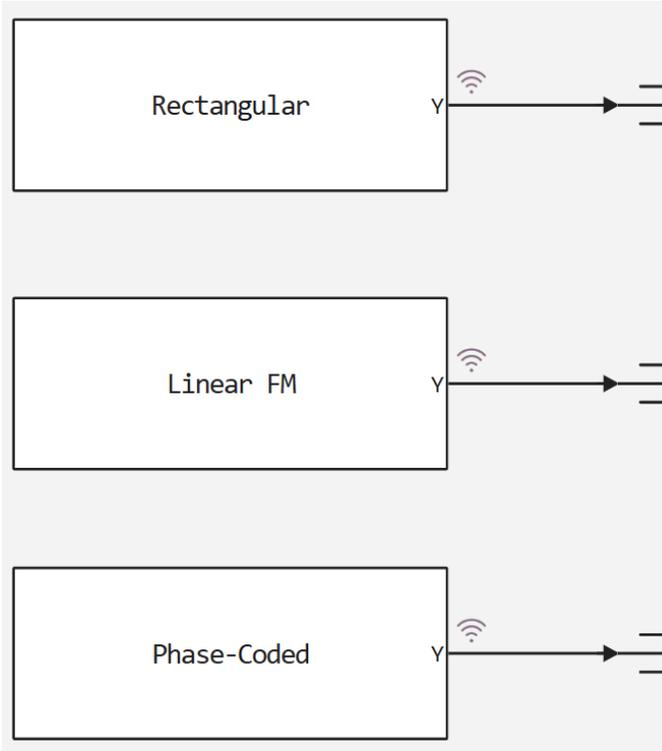
Библиотека генераторов

Формирование зондирующего сигнала

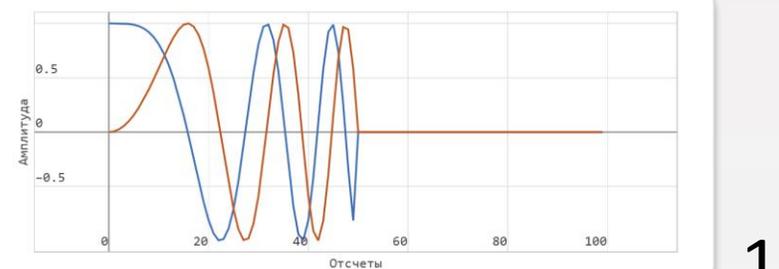
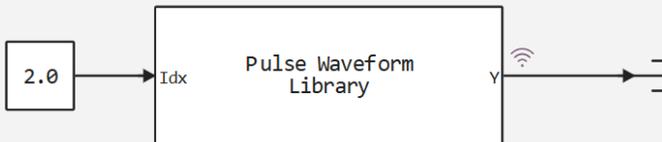


EngeePhased

Генераторы сигналов



EngeeRadar





Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 

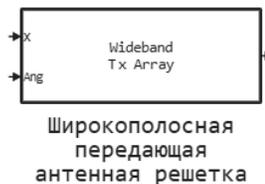
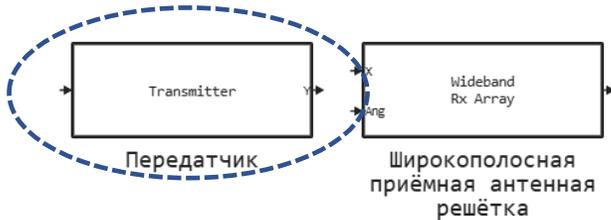
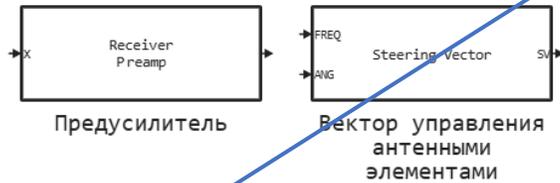
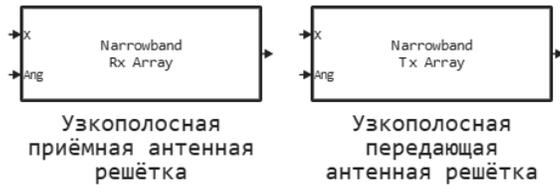
Моделирование передатчика

Моделирование приемо-передающего модуля



EngeePhased

▼ Передатчики и приёмники



▼ Основные

Пиковая мощность (Вт) →

Коэффициент усиления (дБ) →

Потери в аппаратуре (дБ) →

Включение выхода состояния передатчика (TR)

Сохранение когерентности между импульсами

$$SNR = \text{albersheim}(P_d, P_{fa}, N)$$

$$P_t = \text{radareqpow}(\lambda, R, SNR, \tau; RCS, Gain)$$

$$SNR = -5 \log_{10} N + \left(6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N + 0.44}} \right) \times \log_{10} (A + 0.12AB + 1.7B)$$

$$A = \ln \left(\frac{0.62}{P_{FA}} \right)$$

$$B = \ln \left(\frac{P_D}{1 - P_D} \right)$$

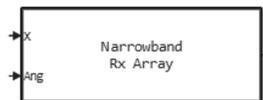
Моделирование приемника

Моделирование приемо-передающего модуля

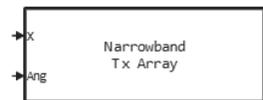


EngeePhased

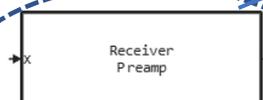
▼ Передатчики и приёмники



Узкополосная приёмная антенная решётка



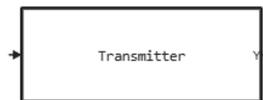
Узкополосная передающая антенная решётка



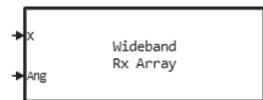
Предусилитель



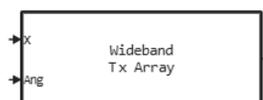
Вектор управления антенными элементами



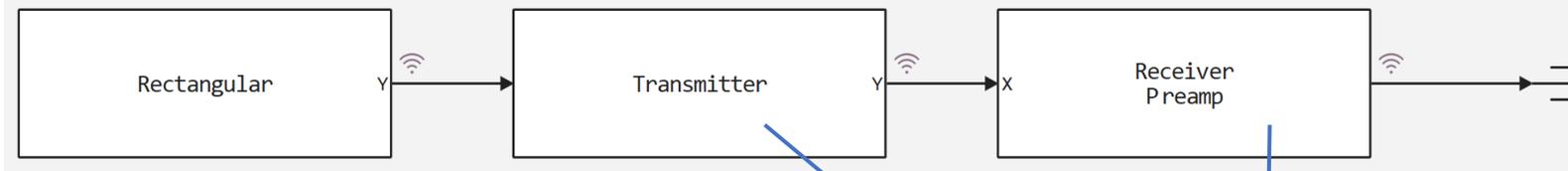
Передатчик



Широкополосная приёмная антенная решётка



Широкополосная передающая антенная решётка



▼ Основные

Коэффициент усиления (дБ):

0

Потери в аппаратуре (дБ)

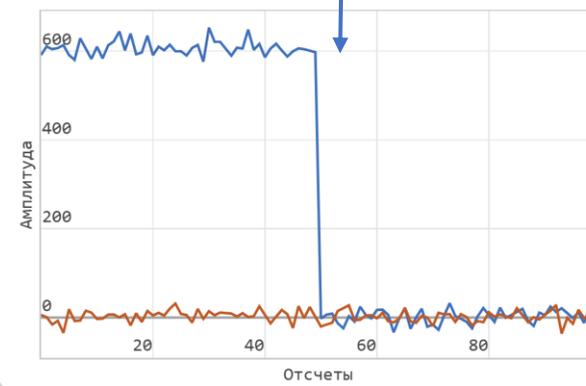
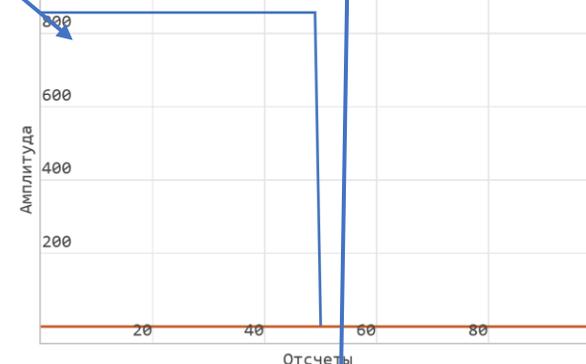
3

Метод задания уровня шума

Мощность шума

Мощность шума (Вт)

?





Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 

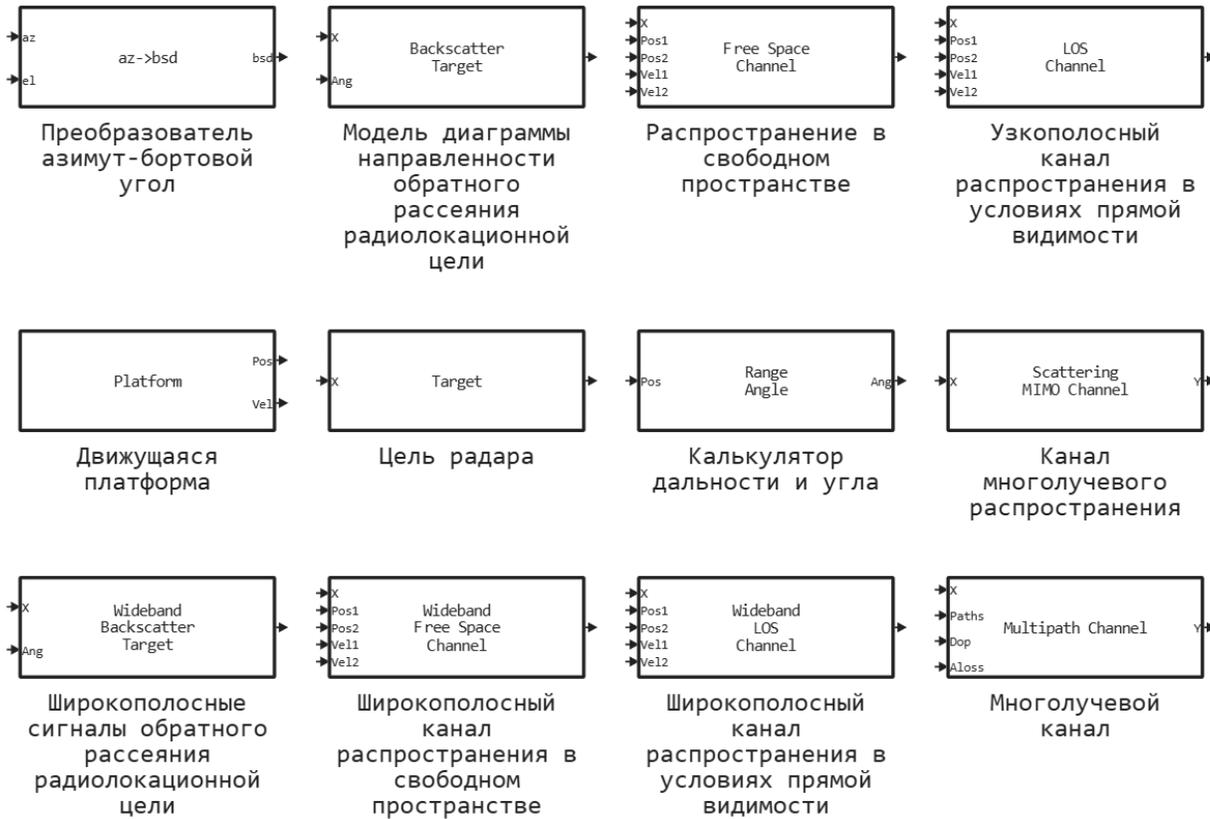
Моделирование канала распространения и цели

Моделирование канала распространения и цели



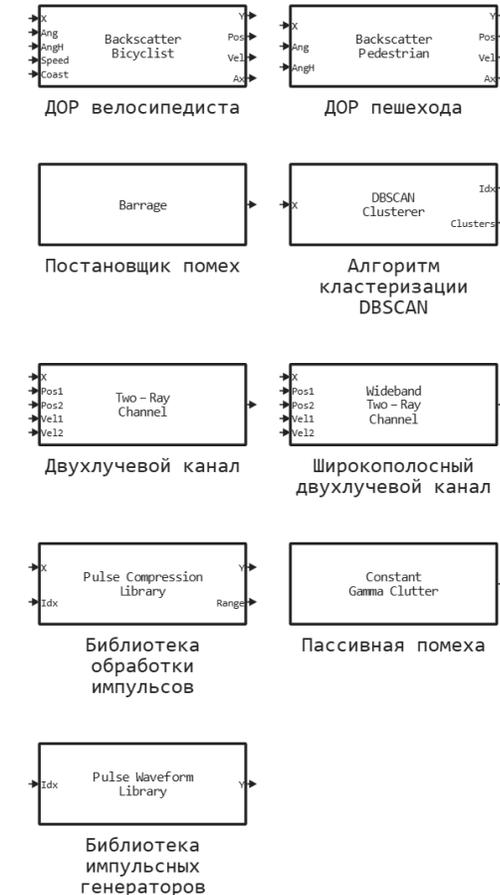
EngeePhased

▼ Среда и цель



EngeeRadar

▼ Радары



Моделирование канала распространения и цели

Моделирование канала распространения и цели



Редактор скриптов

LOS_Ex_new.ngscript

Моделирование распространения радиочастотных сигналов

В этом примере показано, как моделировать несколько эффектов распространения радиочастот. К ним относятся потери на пути в свободном пространстве, атмосферное затухание из-за дождя, тумана и газа, а также многолучевое распространение из-за отражения от земли. Это обсуждение основано на рекомендациях серии Р Международного союза электросвязи ITU-R. ITU-R - это сектор радиосвязи организации, а серия Р посвящена распространению радиоволн.

Введение

Для правильной оценки работы радаров и систем беспроводной связи очень важно понимать условия распространения сигнала. На примере радара мощность принимаемого сигнала моностатического радара определяется уравнением дальности действия радара:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

где P_t - передаваемая мощность, G - коэффициент усиления антенны, σ - поперечное сечение радара цели (RCS), λ - длина волны и R - расстояние распространения. Все потери при распространении, кроме потерь в свободном пространстве, включены в этот термин. В оставшейся части примера показано, как оценить этот член в различных сценариях.

Потери пути в свободном пространстве

Сначала вычисляются потери пути в свободном пространстве как функция расстояния распространения и частоты. В свободном пространстве радиочастотные сигналы распространяются с

Автоподстройка графиков Код Выполнено Последняя выполненная ячейка Активная ячейка

EnggePhased



Распространение в свободном пространстве



Цель радара



Движущаяся платформа

Сигнал на выходе: $y(t) = \frac{x(t - \tau)}{L}$

Задержка: $\tau = \frac{R}{c}$ Потери: $L = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2}$

Сдвиг Доплера: $\frac{v}{\lambda}$ (в одну сторону) $L = 1, R \leq \frac{\lambda}{4\pi}$

Сигнал на выходе: $Y = \sqrt{G} \cdot X \quad G = \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2}$

Модель движения:

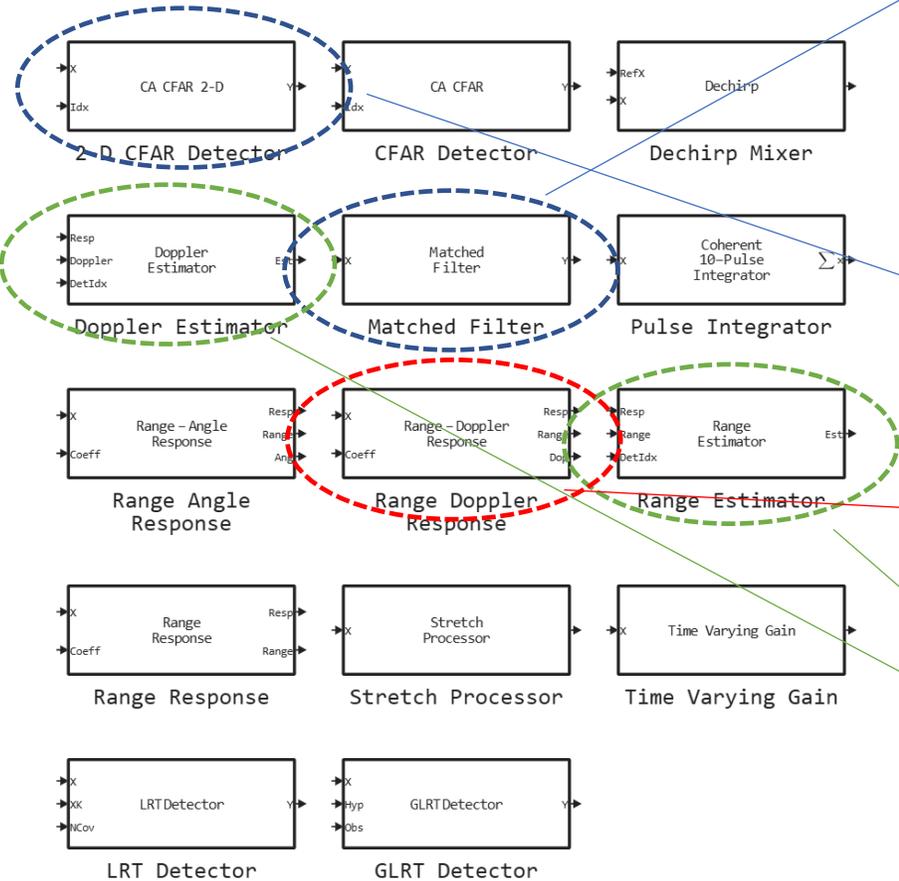
- скорость;
- ускорение;
- пользовательский.

Обработка сигнала



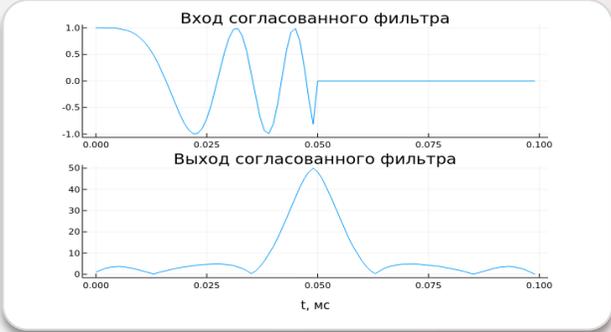
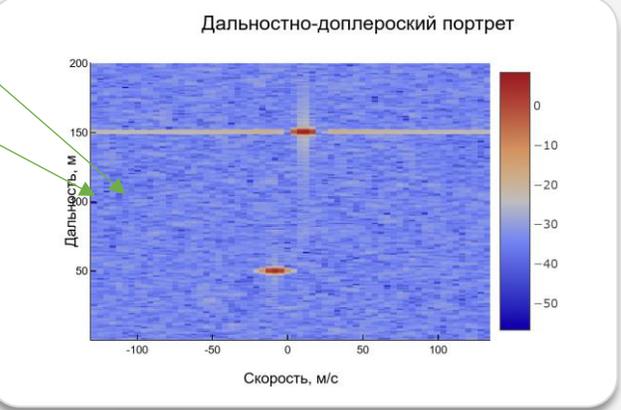
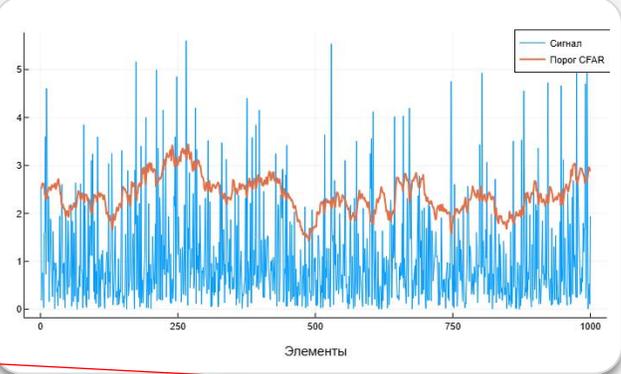
EngeePhased

▼ Обнаружение сигнала



$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

$$h_{\text{согл}}(t) = kx(t_0 - t) \quad t = t_0 - \tau$$



▼ Range Settings

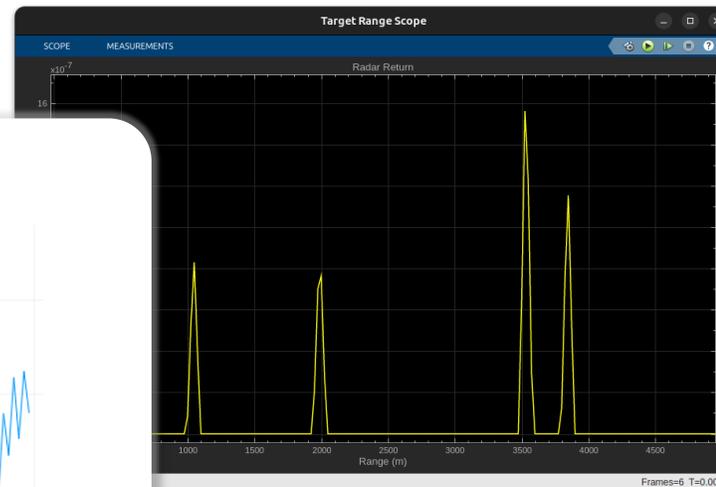
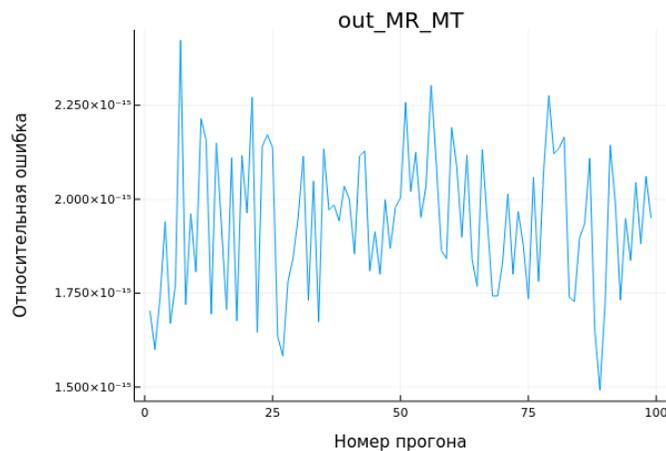
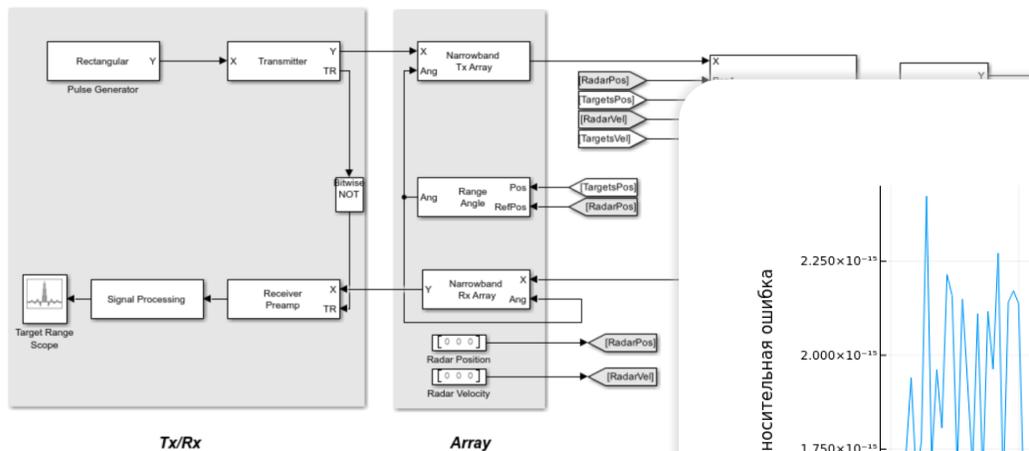
- Range processing method:
- Propagation speed (m/s): Matched filter, БПФ
- Inherit sample rate:
- Reference range (m):

Сравнение результатов по точности

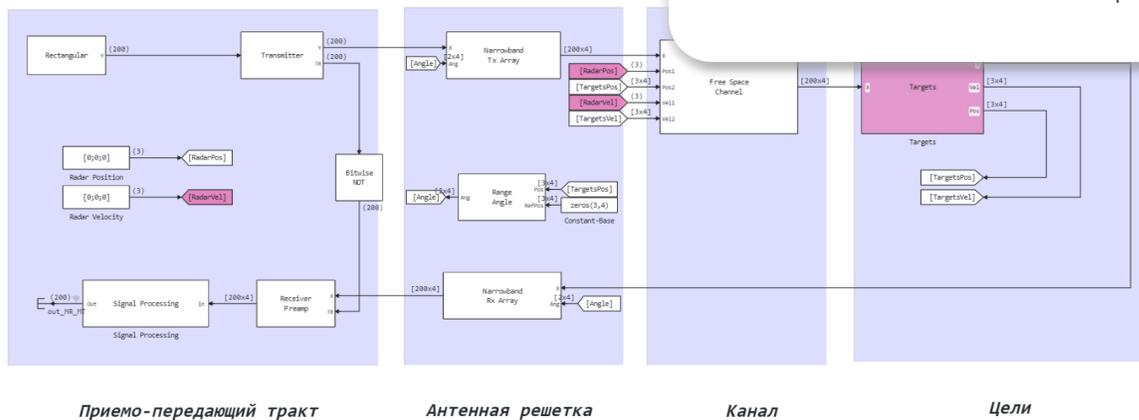
Обработка сигнала



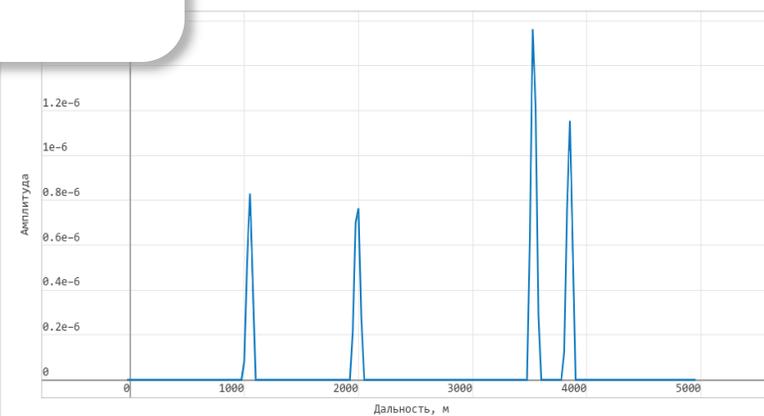
Monostatic Phased Array Radar with Multiple Targets



Моностатический радар для обнаружения целей



Выход радара





Практика на системных объектах

Модель из базовых
радиолокационных блоков



Алгоритмы пеленгации



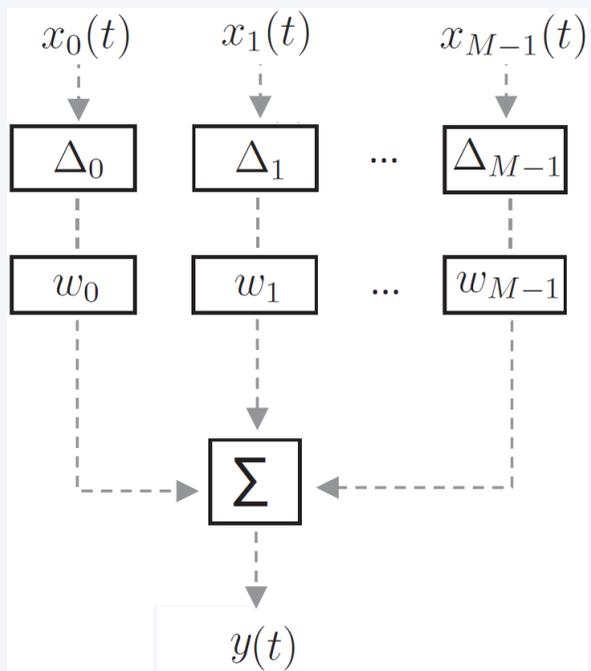
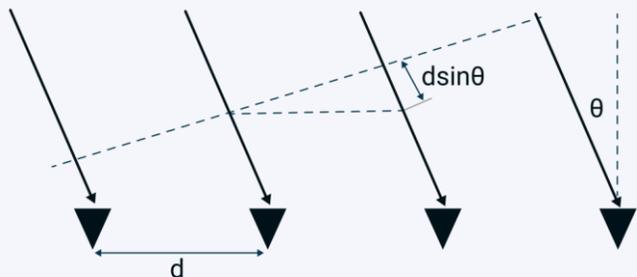
Алгоритмы ФДН антенной решетки



Модель автомобильного
радары



Алгоритмы ФДН



$$x_m(t) = \exp(j\omega(t - \Delta_m(\theta)))$$

$$y(t) = \exp(j\omega t) \sum_{m=0}^{M-1} w_m^* \exp(-j\omega \Delta_m(\theta))$$

$$y(t) = \exp(j\omega t) r(\theta, \omega)$$

$$r(\theta, \omega) = \mathbf{W}^H \mathbf{d}(\theta, \omega)$$

$$\mathbf{d}(\theta, \omega) = [1 \quad \exp(j\omega \Delta_1(\theta)) \quad \exp(j\omega \Delta_2(\theta)) \quad \dots \quad \exp(j\omega \Delta_{M-1}(\theta))]^H$$

CBF

$$E\{|y|^2\} = P = \mathbf{W}^H E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\} \mathbf{W} = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}$$

LCMV

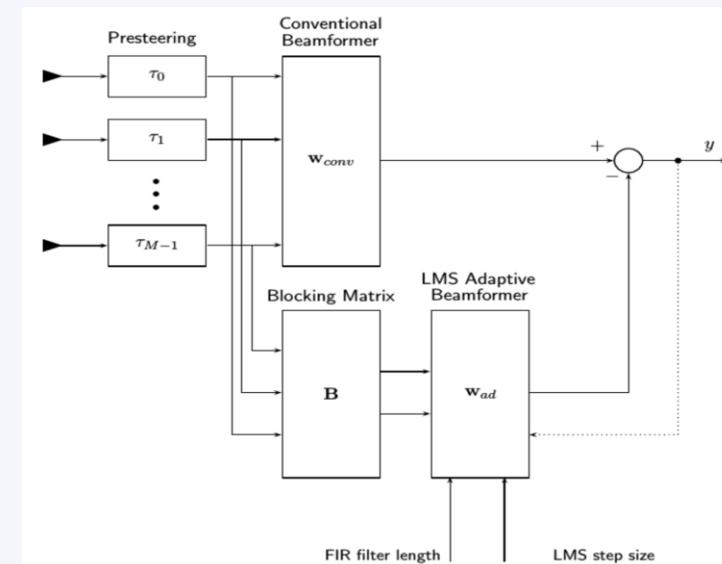
$$\min_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \quad \mathbf{d}^H(\theta, \omega) \mathbf{W} = g^*$$

$$\mathbf{W} = g^* \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}(\theta, \omega)}{\mathbf{d}^H(\theta, \omega) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}(\theta, \omega)}$$

MVDR

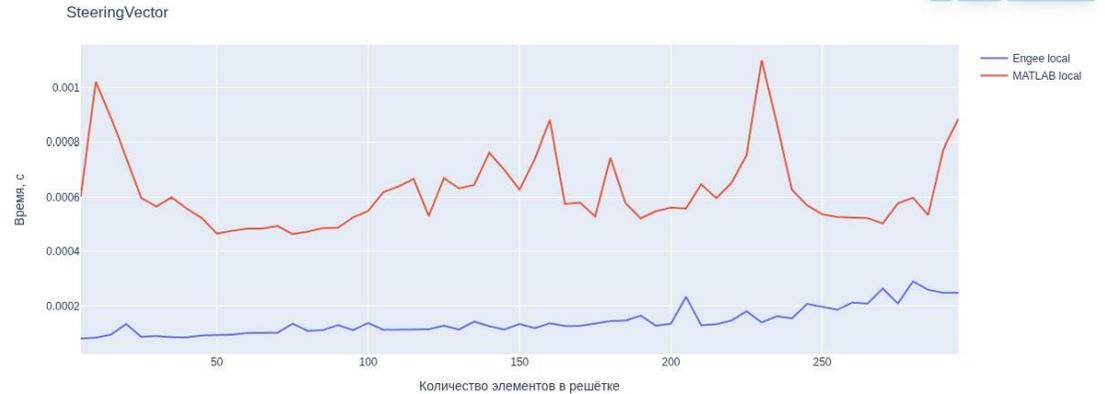
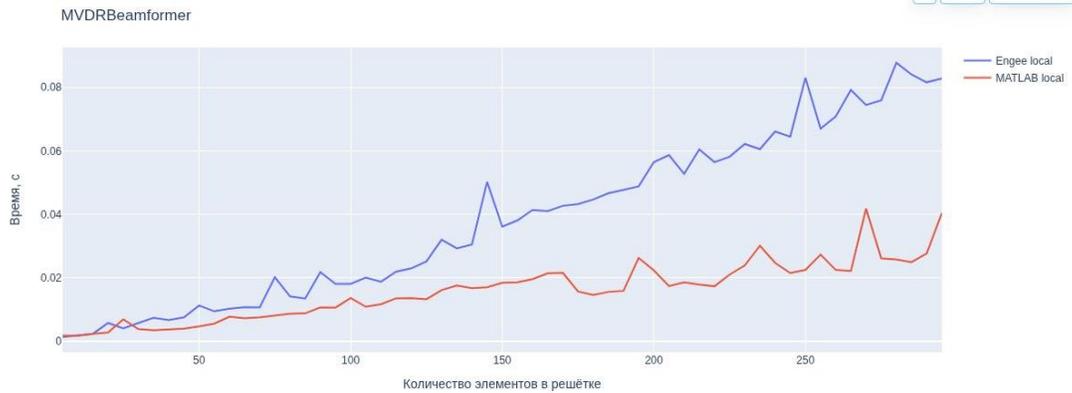
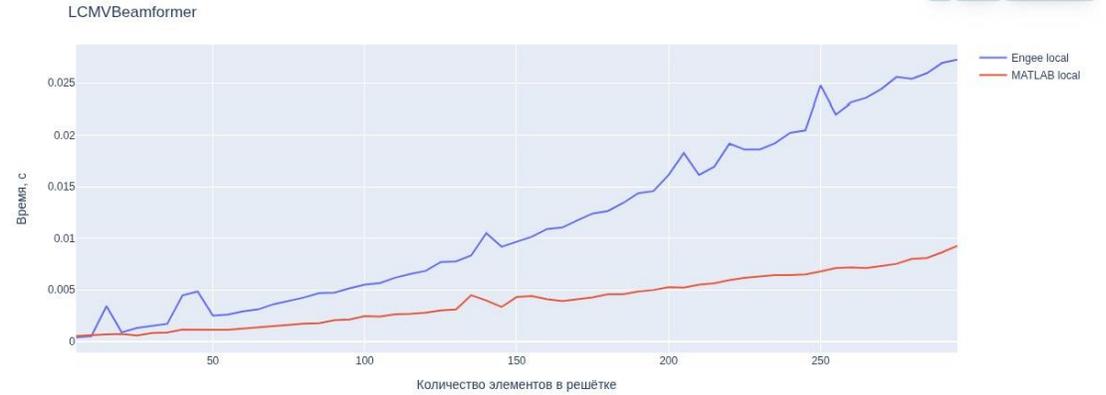
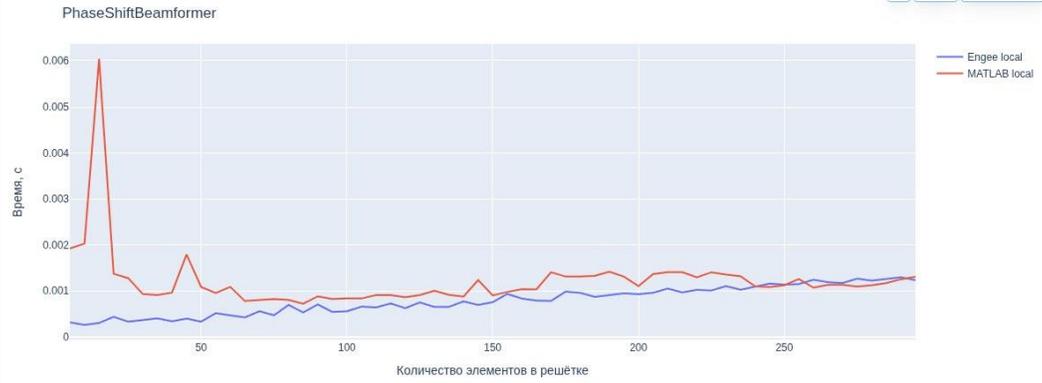
$$\mathbf{d}^H(\theta, \omega) \mathbf{W} = 1 \quad \mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}(\theta, \omega)}{\mathbf{d}^H(\theta, \omega) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}(\theta, \omega)}$$

GSC



Сравнение по скорости

Алгоритмы ФДН антенной решетки





Практика на системных объектах

Модель из базовых
радиолокационных блоков



Алгоритмы пеленгации

Алгоритмы ФДН антенной решетки



Модель автомобильного
радара

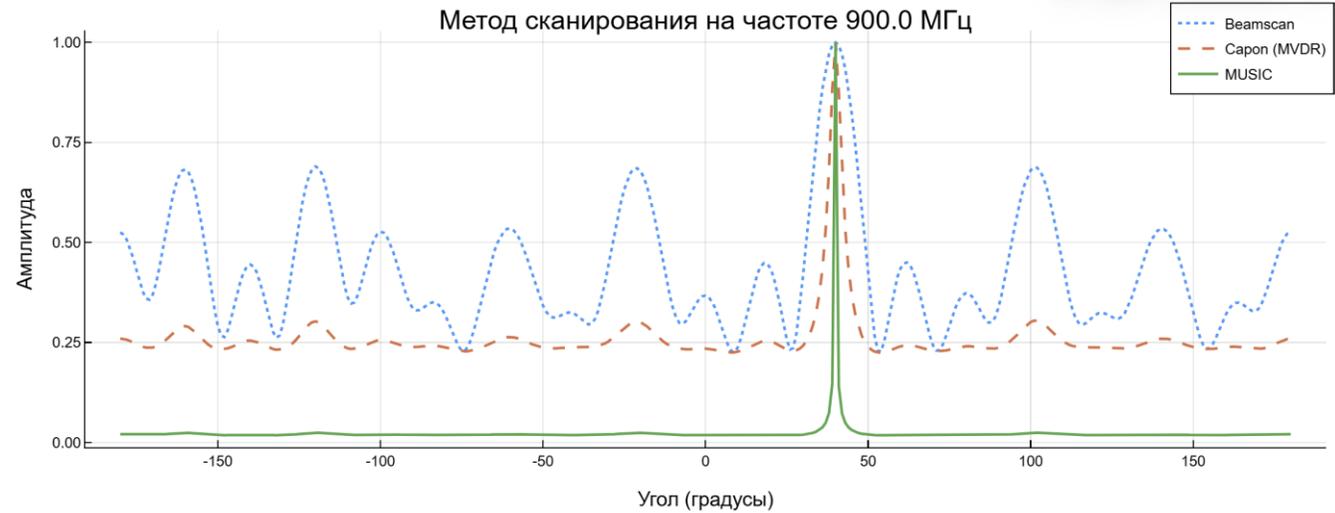
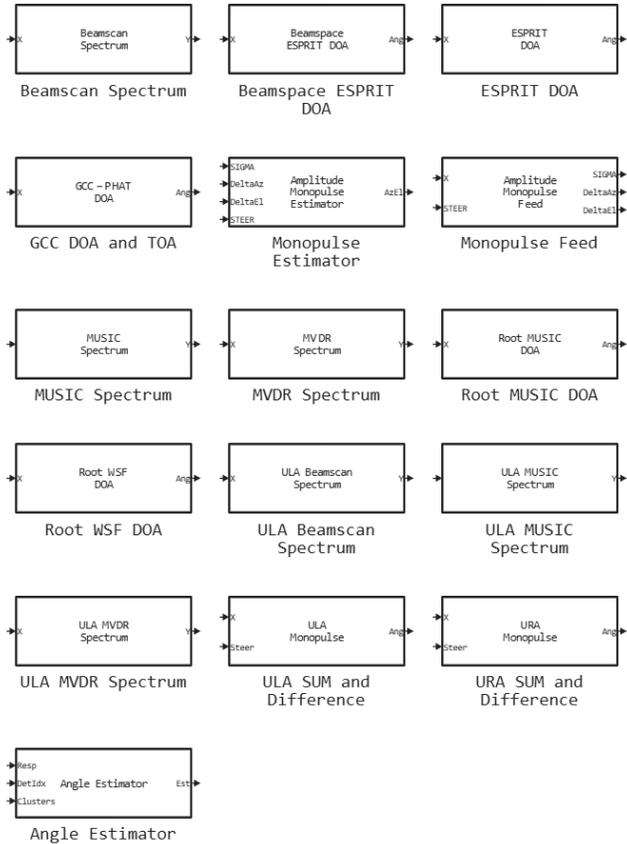


Алгоритмы пеленгации

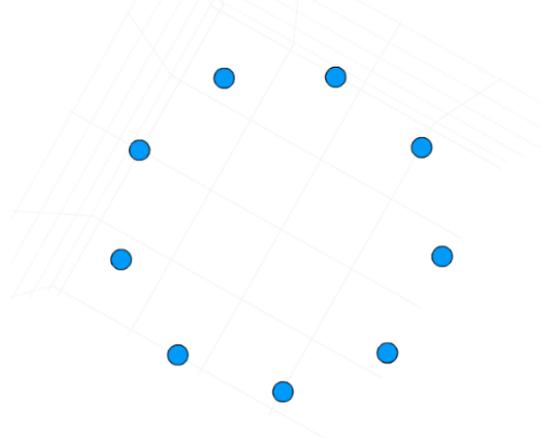
Алгоритмы пеленгации



▼ Пеленгация



Кольцевая антенная решетка



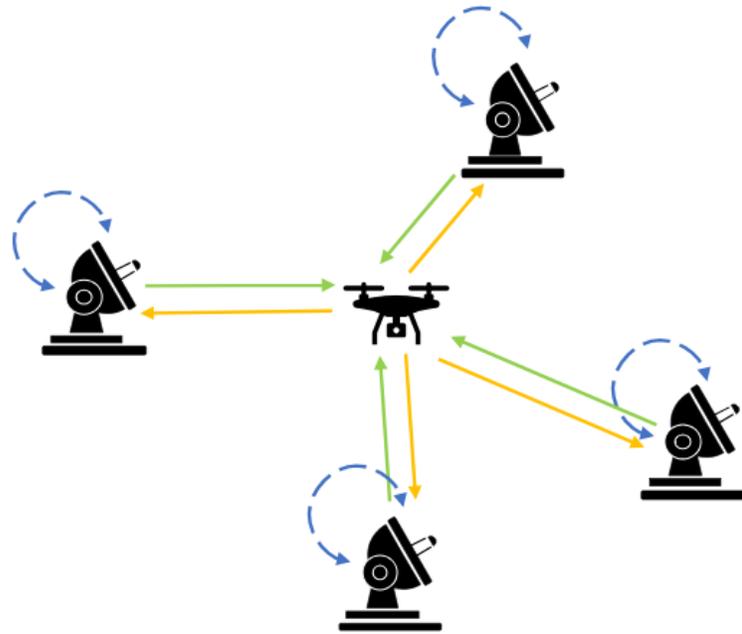
```

beamscan = EngeePhased.BeamscanEstimator2D(
    SensorArray=array,
    OperatingFrequency=freqs,
    AzimuthScanAngles=az_scan_angles
);

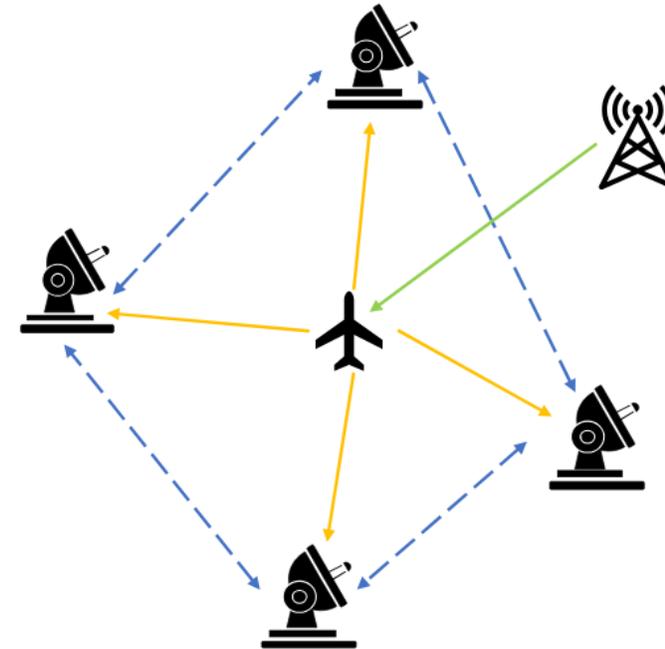
music = EngeePhased.MUSICEstimator2D(
    SensorArray=array,
    OperatingFrequency=freqs,
    AzimuthScanAngles=az_scan_angles
);

capon = EngeePhased.MVDRestimator2D(
    SensorArray=array,
    OperatingFrequency=freqs,
    AzimuthScanAngles=az_scan_angles
);
    
```

Практический пример



Пеленгация в активной радиолокационной системе



Пеленгация в пассивной радиолокационной системе



Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

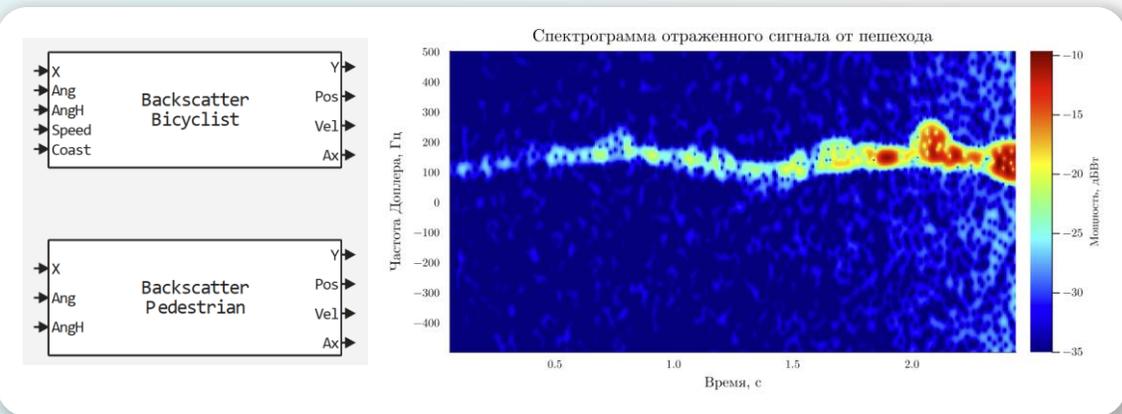
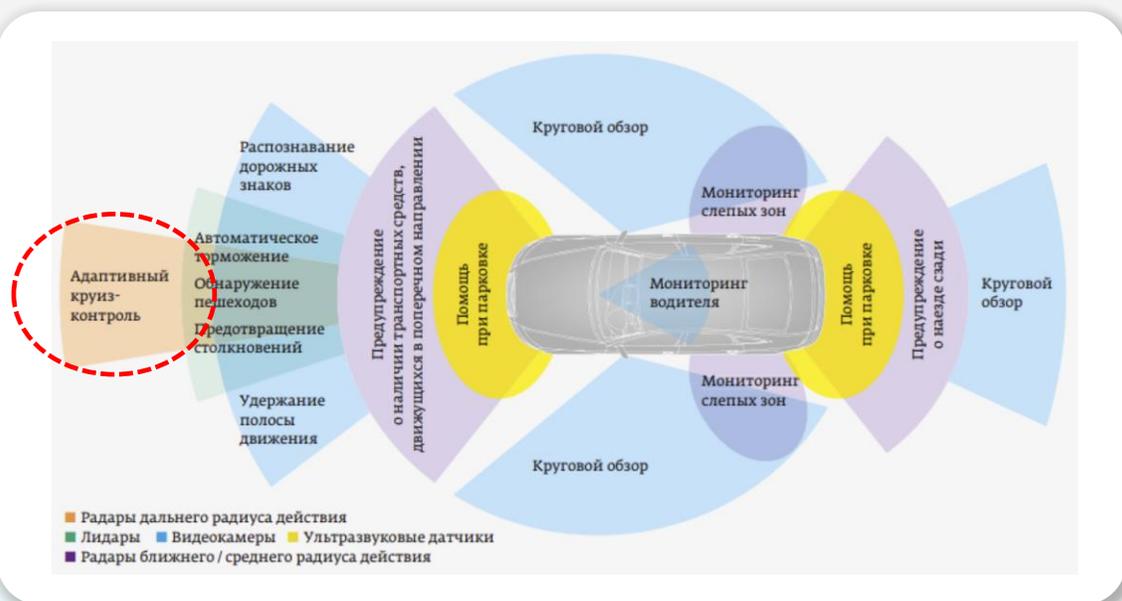
Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 

Построение автомобильного радара

Построение автомобильного радара



	Импульсно-доплеровский	FMCW	FSK	UWB
Сигналы				
Преимущества	простой алгоритм для вычисления дальности	- высокая точность измерения дальности; - можно рассчитывать дальность и скорость.	- относительно простая модуляция с помощью ГУН; - короткие циклы измерения.	- простые принципы; - высокая разрешающая способность.
Недостатки	- трудно оценить скорость; - невозможны одновременная передача и прием.	- нужны дополнительные алгоритмы для устранения ложных целей; - длительное время для измерений нескольких объектов.	- необходимо обеспечить когерентность сигнала; - сложность обработки с неподвижными объектами	- нет прямого измерения скорости; - большая чувствительность ко внешним воздействиям



Практика на МОП

Модель из базовых радиолокационных блоков



Алгоритмы пеленгации



Алгоритмы ФДН антенной решетки



Модель автомобильного радара

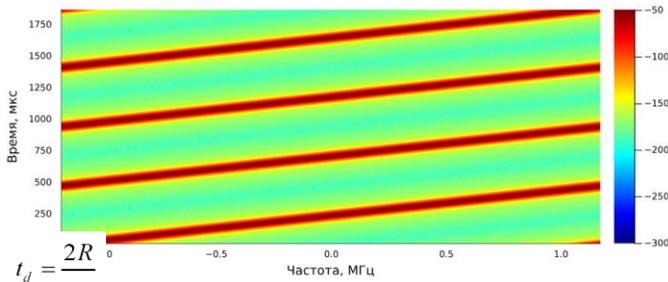


Модель автомобильного радара

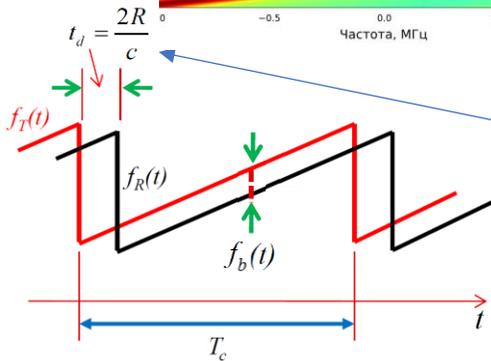


Принцип работы

Спектрограмма входного сигнала



$$x_T(t) = \cos\left(2\pi f_c t + \underbrace{\pi \frac{B}{T_c} t^2}_{\phi_T(t)}\right)$$



$$x_R(t) = \alpha x_T(t - t_d) = \alpha \cos\left(2\pi f_c (t - t_d) + \pi \frac{B}{T_c} (t - t_d)^2\right)$$

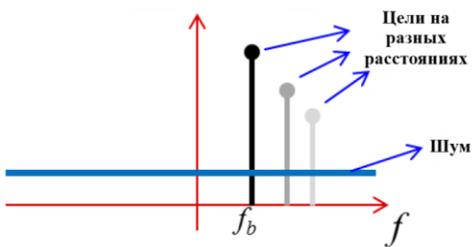
$$y(t) = x_R(t) \times x_T(t) = \alpha \cos(\phi_T(t - t_d)) \times \cos(\phi_T(t))$$

$$y(t) = \frac{\alpha}{2} \left[\cos(\phi_T(t - t_d) - \phi_T(t)) + \cos(\phi_T(t - t_d) + \phi_T(t)) \right]$$

$$\phi_0 - 2\pi \left(\frac{B}{T_c} t_d \right) t$$

f_b

Убираем фильтром



FFT

$$f_b = \left(\frac{2R}{c} \right) \left(\frac{B}{T_c} \right)$$

Обработка сигнала





Теория

Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Подведем итоги 



Введение в моделирование радиолокационных систем в Engage 

Моделирование канала распространения и цели 

Формирование зондирующего сигнала 

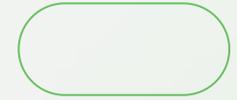
Построение автомобильного радара 

Моделирование приемопередающего модуля 

Алгоритмы ФДН антенной решетки 

Модель из базовых радиолокационных блоков 

Алгоритмы пеленгации 



 **ЭКСПОНЕНТА**
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование
радиолокационных систем в Engage

Введение



Москва 2024 г.



Цель создания САПР Engee PTC

Импортозамещение программного и аппаратного обеспечения зарубежных вендоров (MathWorks, Keysight (Agilent), Siemens, Rohde&Schwarz, National Instruments и подобных им) в части проектирования и отладки микроэлектронных и радиотехнических систем.



**МИНПРОМТОРГ
РОССИИ**

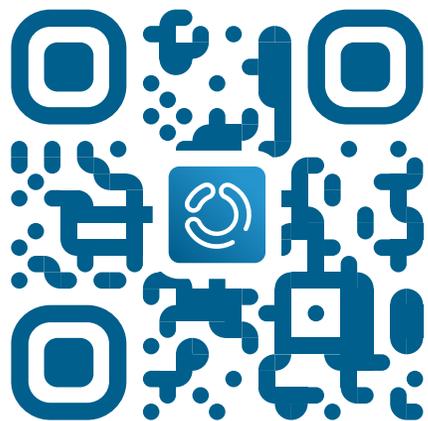
Работы ведутся в рамках субсидии Минпромторга России на финансовое обеспечение в области средств производства электроники от 14 октября 2024 года №23-67771-00835-Р согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 25 октября 2023 года №1780

Полезные ссылки

КОНТАКТЫ



Сайт
Engee



start.engee.com



Telegram-канал
«Engee на старт!»



[@engee_com](https://t.me/@engee_com)



Сайт
ЦИТМ «Экспонента»



exponenta.ru



ЭКСПОНЕНТА

ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ



**Спасибо за
внимание!**

