



# Расчет рассеяния плоской электромагнитной волны

Алексей Харитонович  
Руководитель направления развития, Т1  
aikharitonovich@t1.ru  
@alexeykharitonovich  
89104217011



Свидетельство в Роспатенте  
№ 2022663085



В реестре Российского ПО  
№ 15125



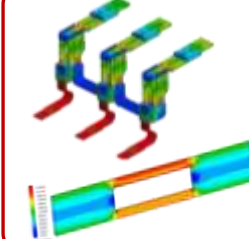
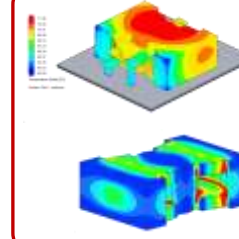
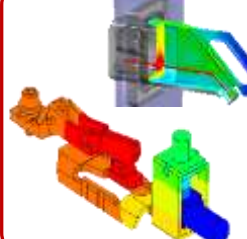
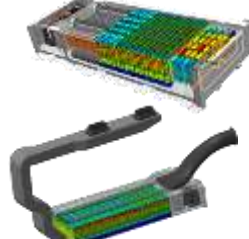
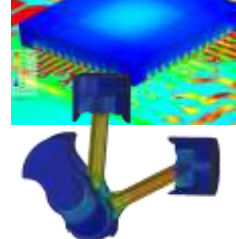
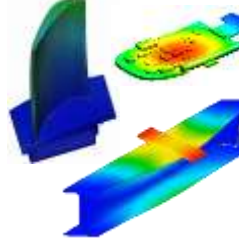
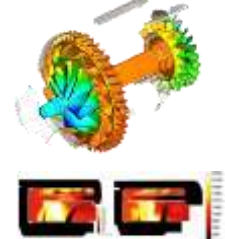
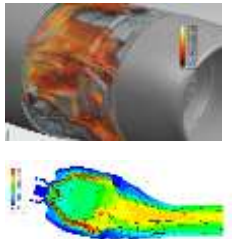
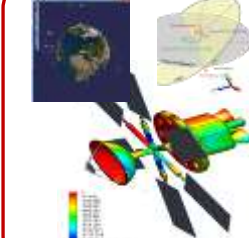
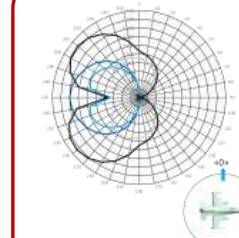
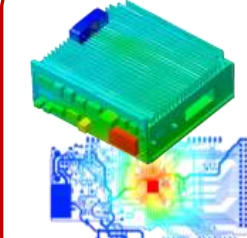
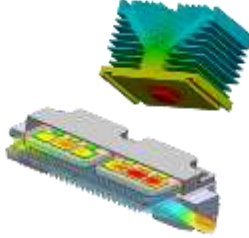
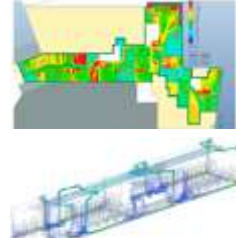
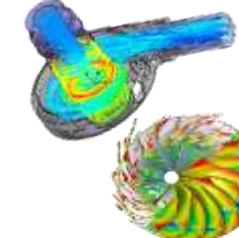
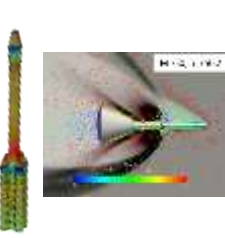
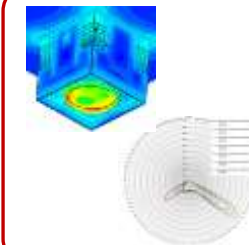
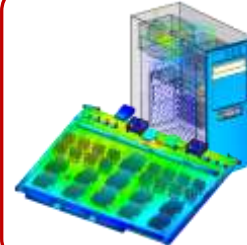
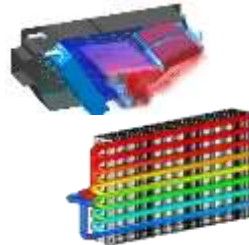
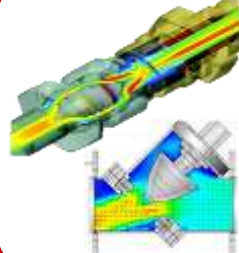
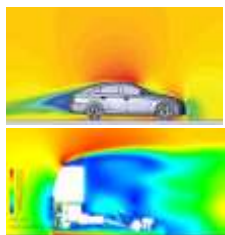
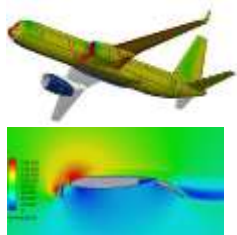
Член АРПП  
«Отечественный СОФТ»

## АЭРОДИНАМИКА

## ГИДРАВЛИКА

## ТЕПЛООБМЕН

## ИЗЛУЧЕНИЕ и ОПТИКА



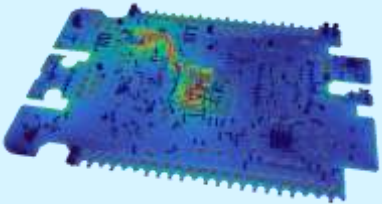
## ГОРЕНИЕ и ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

## ПРОЧНОСТЬ

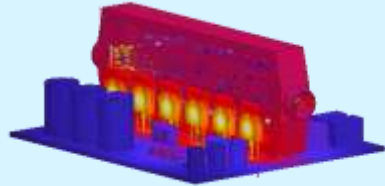
## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

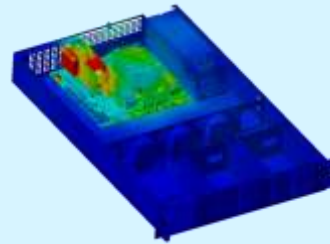
Целостность  
питания плат



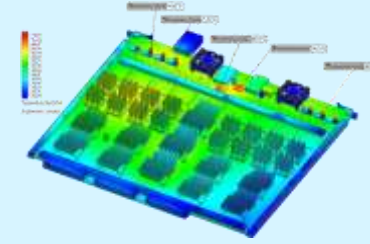
Жидкостное  
охлаждение



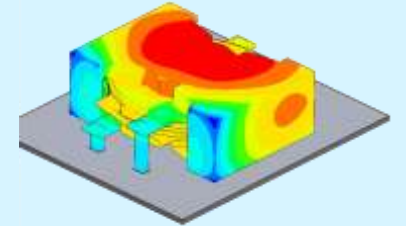
Расчет вентиляции  
серверов



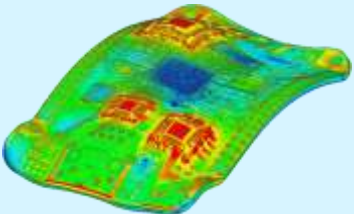
Воздушное  
охлаждение



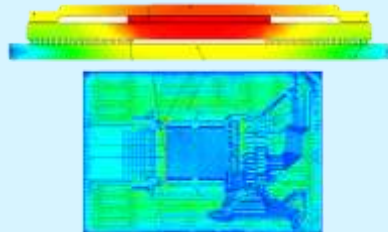
Электромагнетизм  
низкочастотный



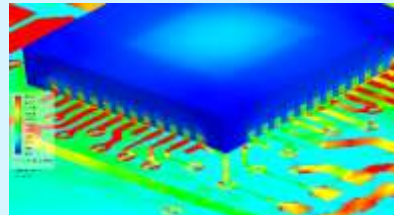
Корабление плат и  
термонапряжения



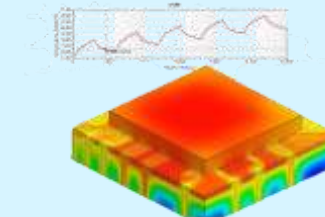
Корпусирование



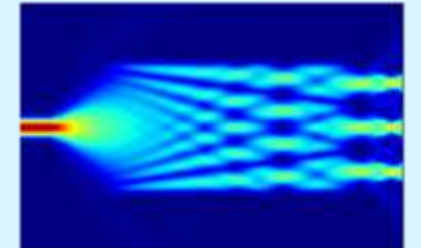
Анализ прочности



Нестационарный  
анализ ЭКБ

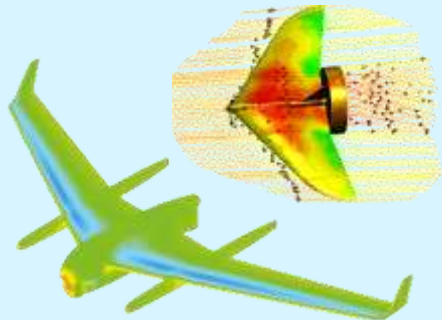


Фотоника



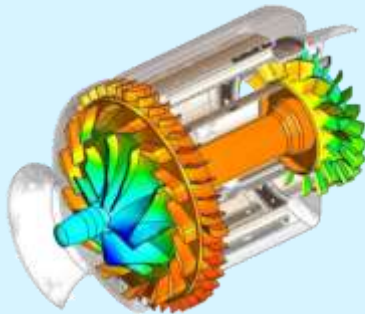


Планер



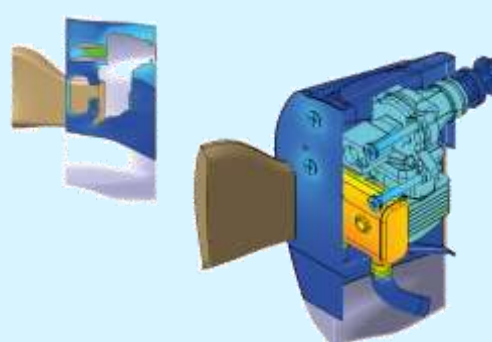
Аэродинамика

Двигатели



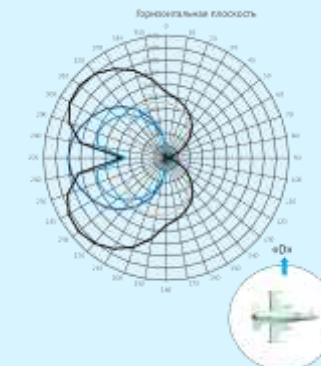
Горение газовых смесей

Теплообменник



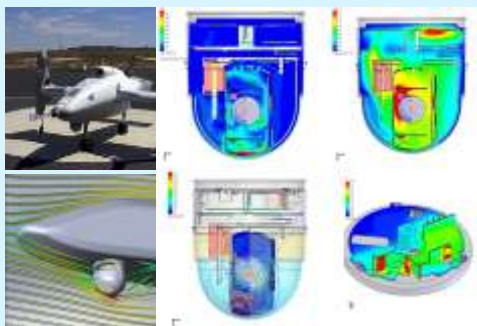
Теплообмен

Тепловая заметность



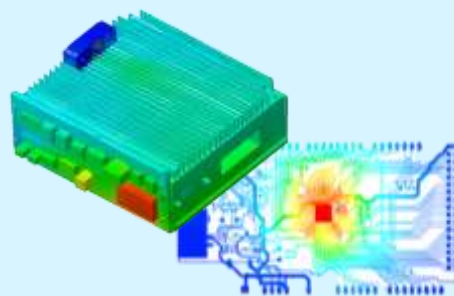
Излучение

Камера



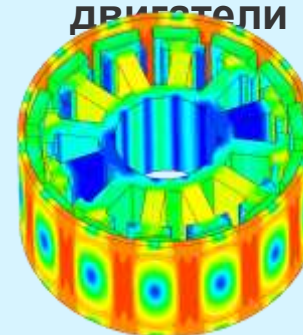
Оптика

Электроника



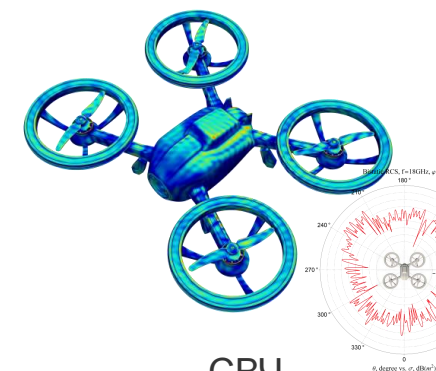
Тепло, прочность, ток, платы

Электрические  
двигатели



Электромагнетизм

Расчет ЭПР



СВЧ

# Расчет рассеяния плоской электромагнитной волны на объекте



В CADFlo для расчета высокочастотных электромагнитных помех при работе электронных устройств создано и создаются ряд расчетных методик, включаемых в программный продукт. Одна из них основана на быстром многоуровневом метода мультиполей (MLFMM). Эта методика может быть использована для расчета рассеяния плоской электромагнитной волны на объекте.



Параметры расчета:

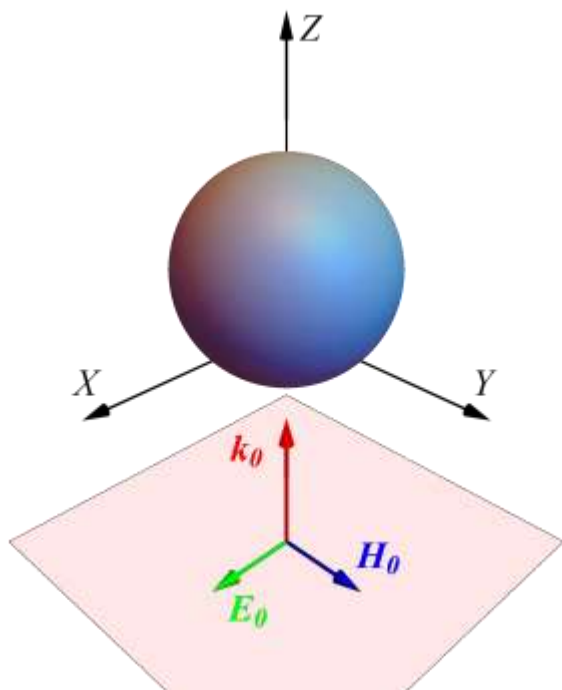
*Объект* – полномасштабная модель самолета F-22, идеальный проводник

*Падающая электромагнитная волна* – плоская с частотой 200 МГц, 1 ГГц, 12 ГГц падающая под углом  $45^\circ$  к оси объекта в плоскости планера

Сравнение получаемых результатов по возбуждаемым токам и эффективной площади рассеяния (ЭПР) производится с программным аналогом фирмы Dassault - CST

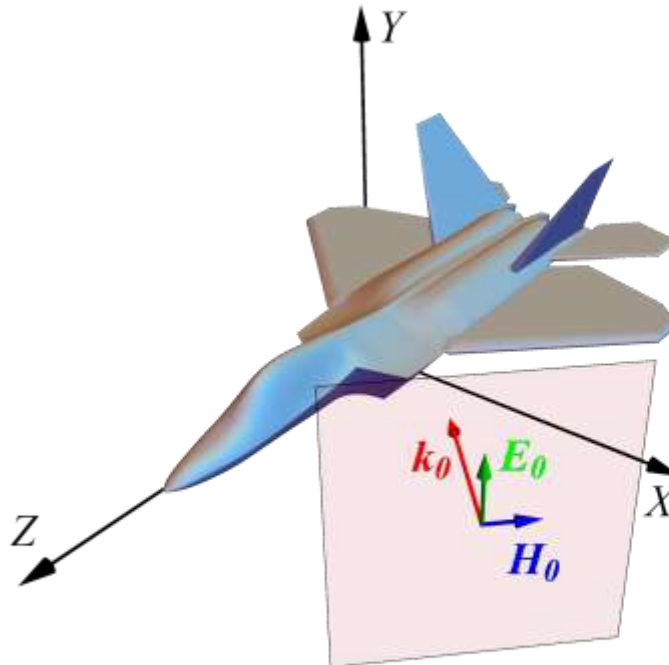
# Рассматриваемые задачи

Падающее поле – плоская монохроматическая волна.



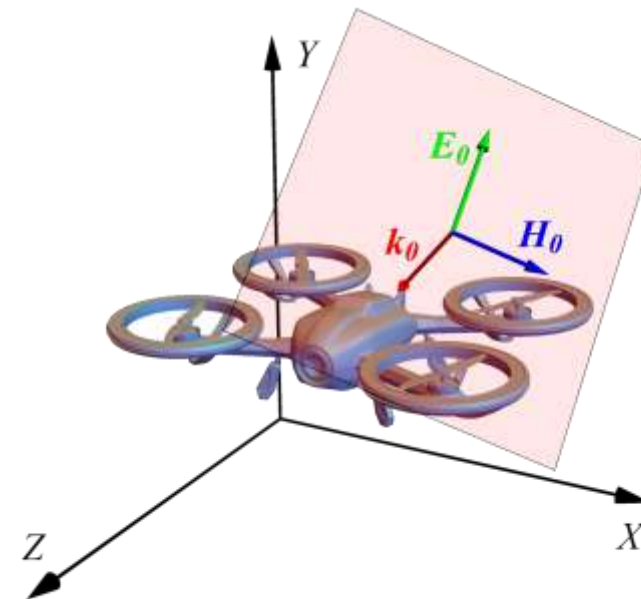
Сфера (PEC,  
диэлектрик)

Линейный размер – 2 м



F-22  
(PEC)

Линейный размер – 19 м

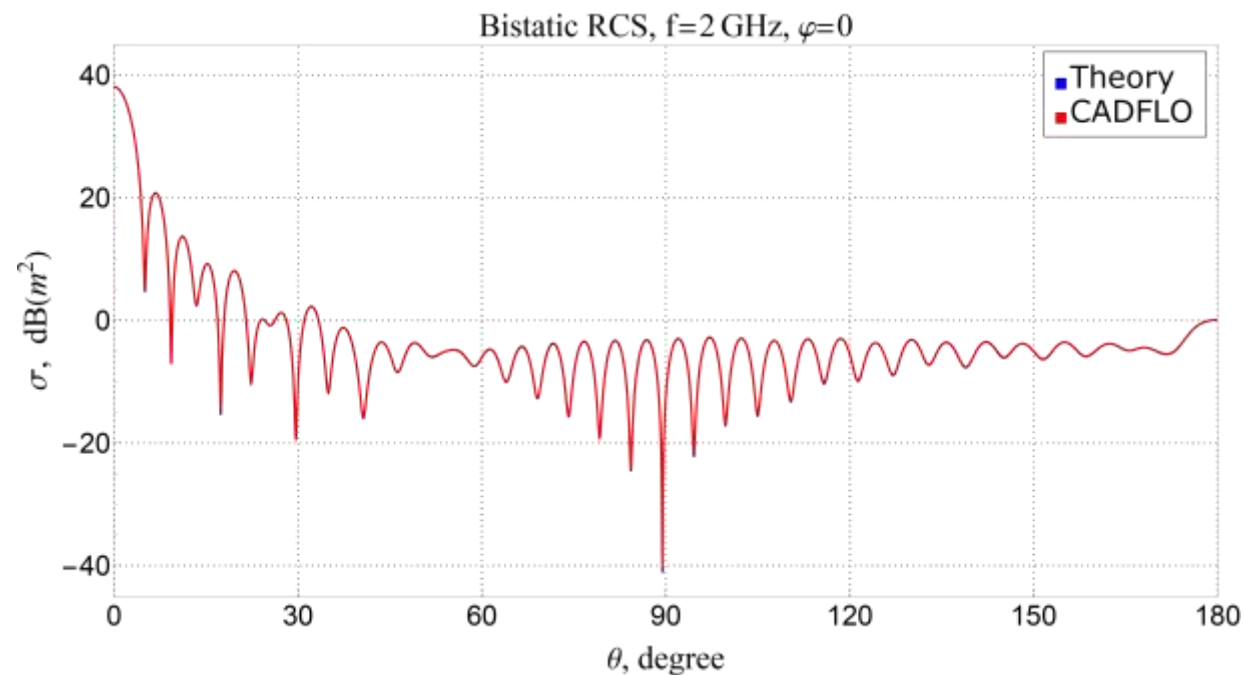
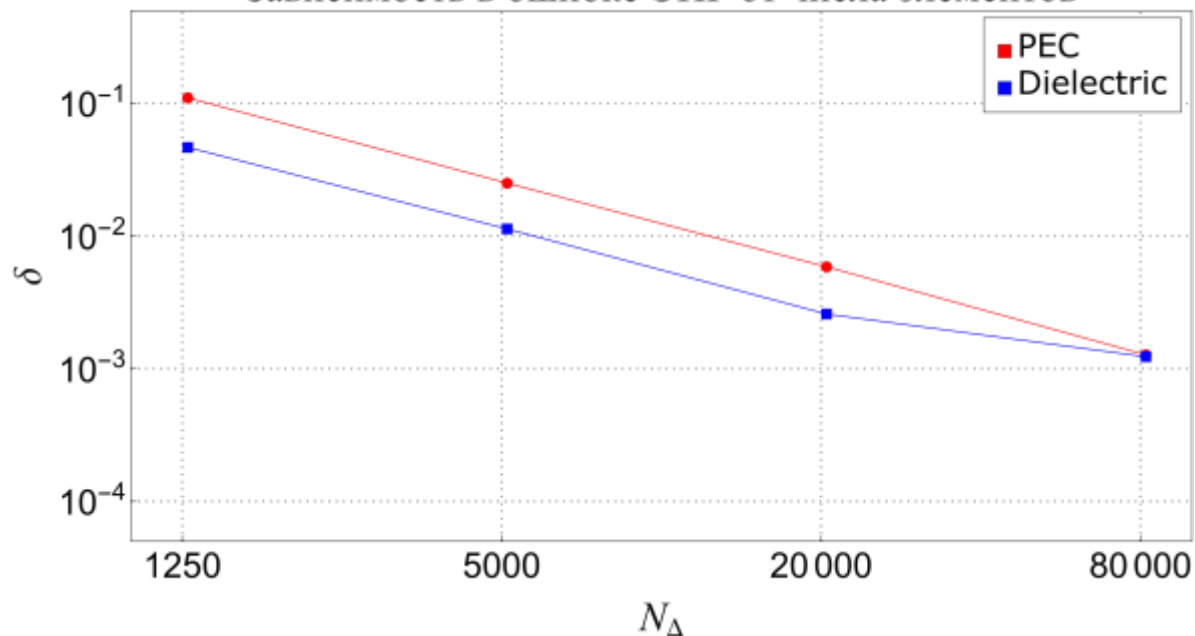


Дрон (PEC +  
диэлектрики)

Линейный размер – 1 м

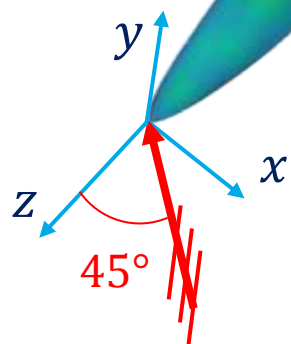
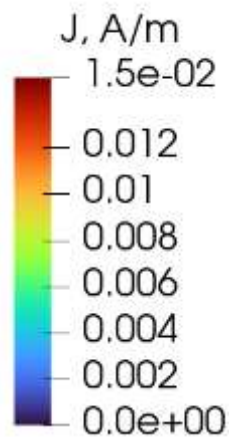
Дифракция на идеально проводящей и диэлектрической сфере: 2-й порядок сходимости.

Зависимость в ошибке ЭПР от числа элементов

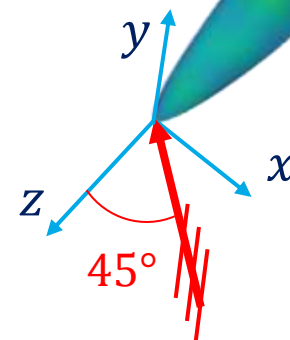


Диэлектрическая сфера ( $\epsilon_r = 4 + 0.08i$ )

# Рассеяние плоской волны (200 MHz) на объекте



CST

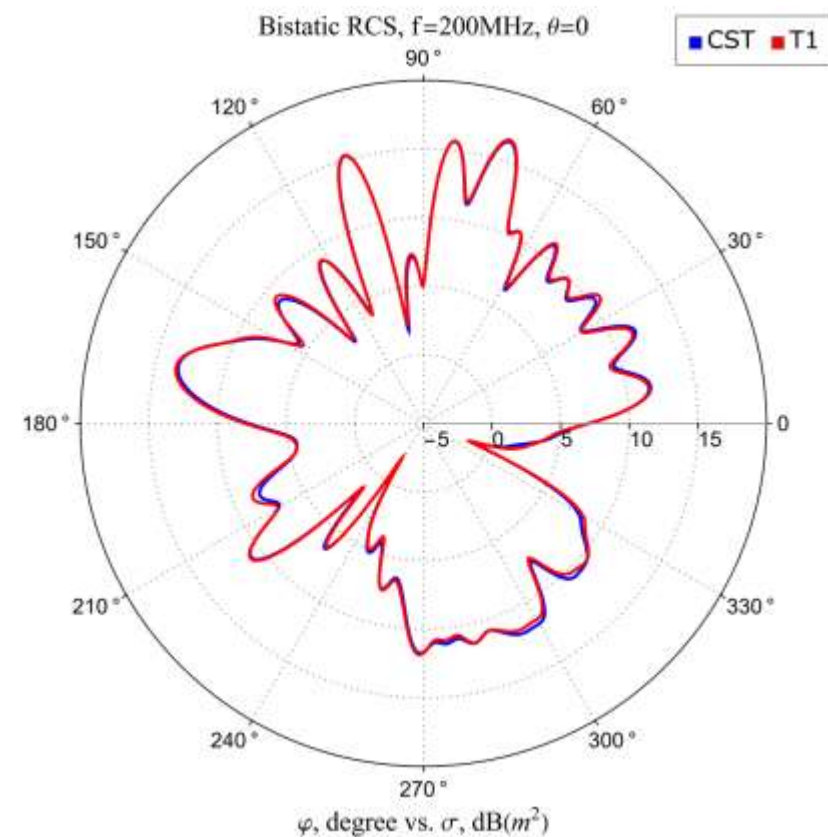
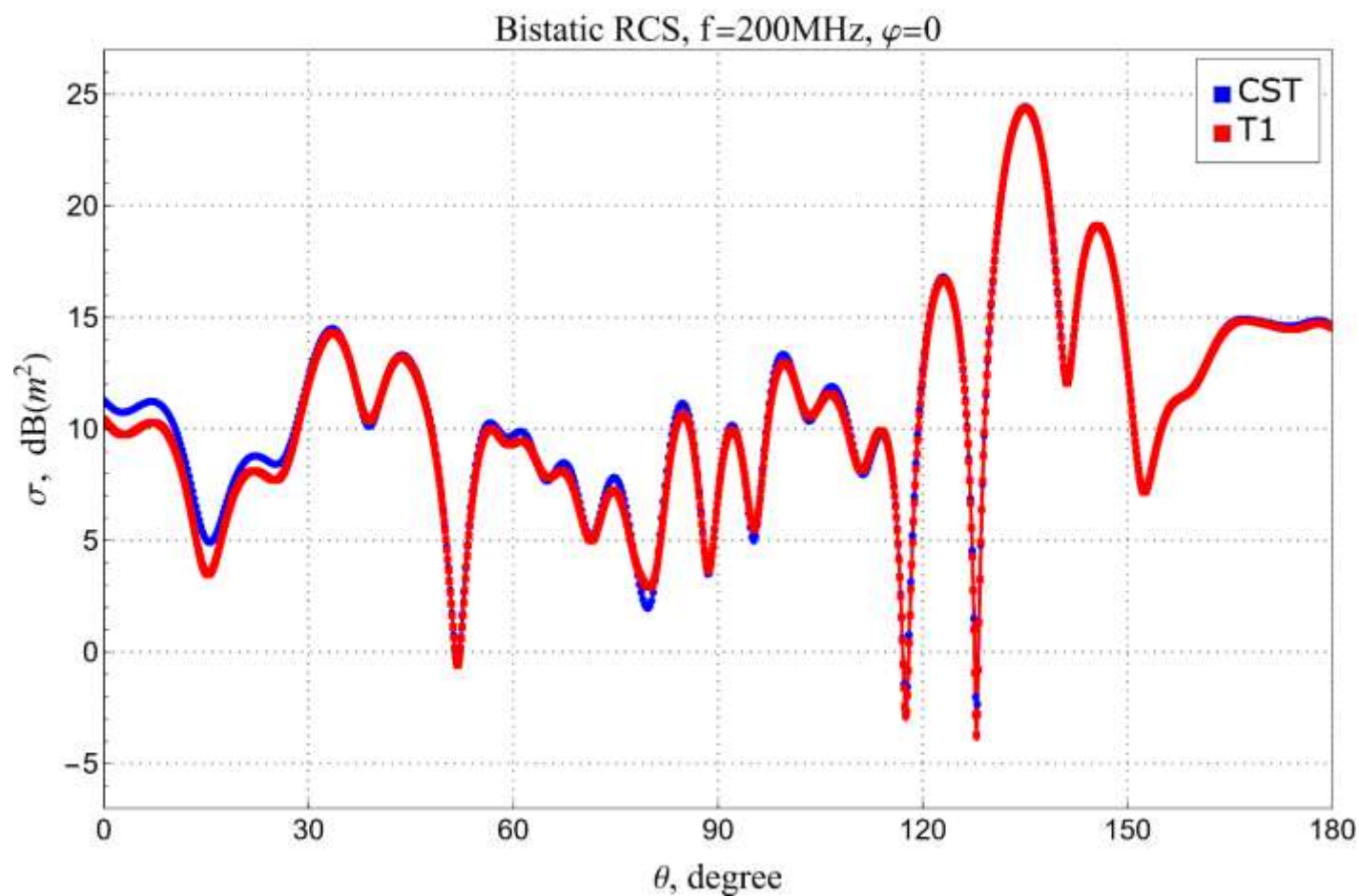


CADFlo

Расчет плотности наведенного тока

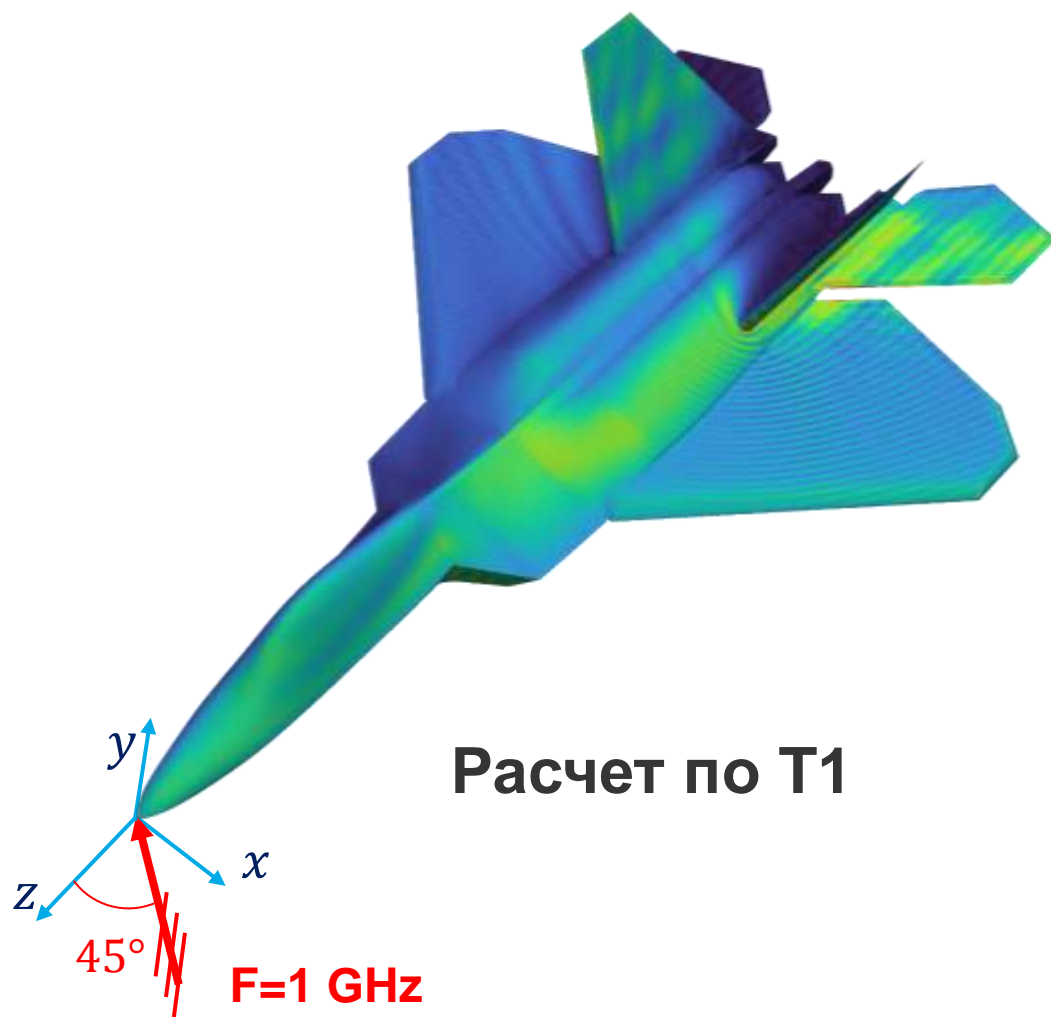


# Бистатистическая ЭПР (200 MHz)

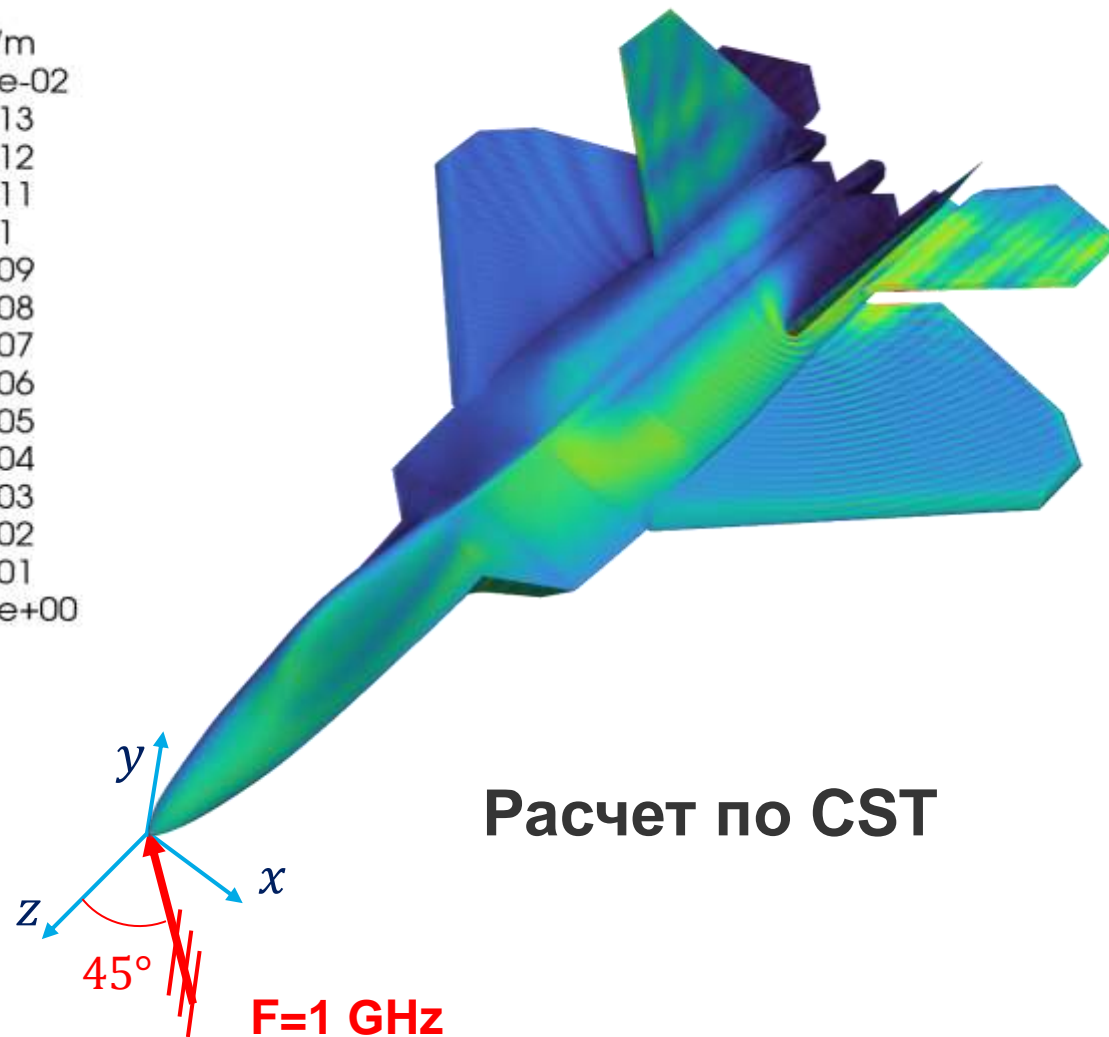
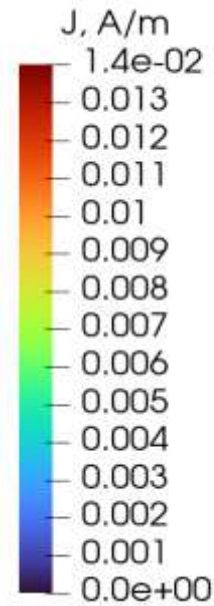


$$\sigma = 10 \lg \left( 4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2} \right), \text{dB} (m^2)$$

$R$  – расстояние до РЛС,  $E_1$  – напряженность поля волны в месте объекта,  $E_2$  – напряженность поля отраженной волны в месте РЛС

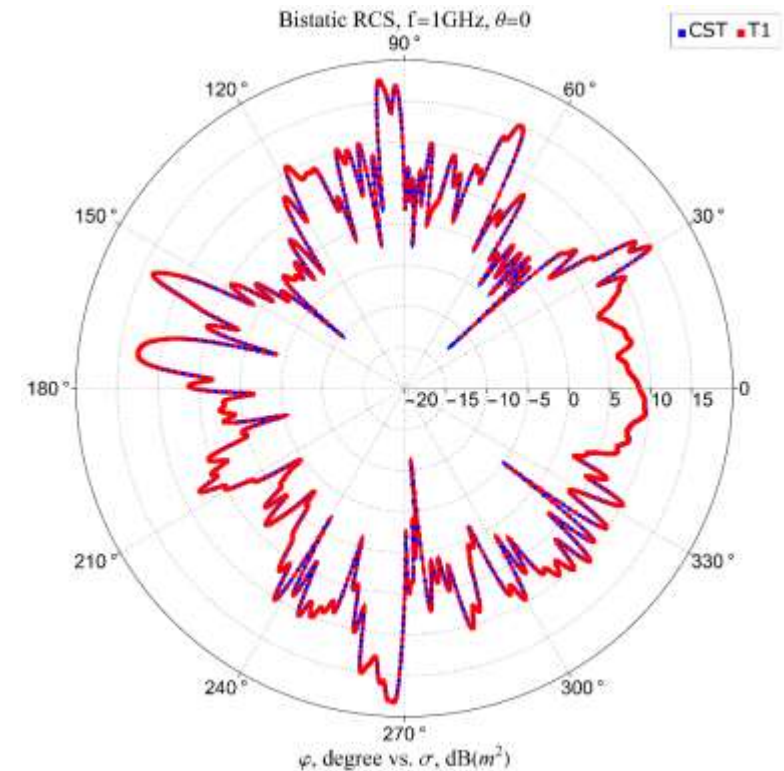
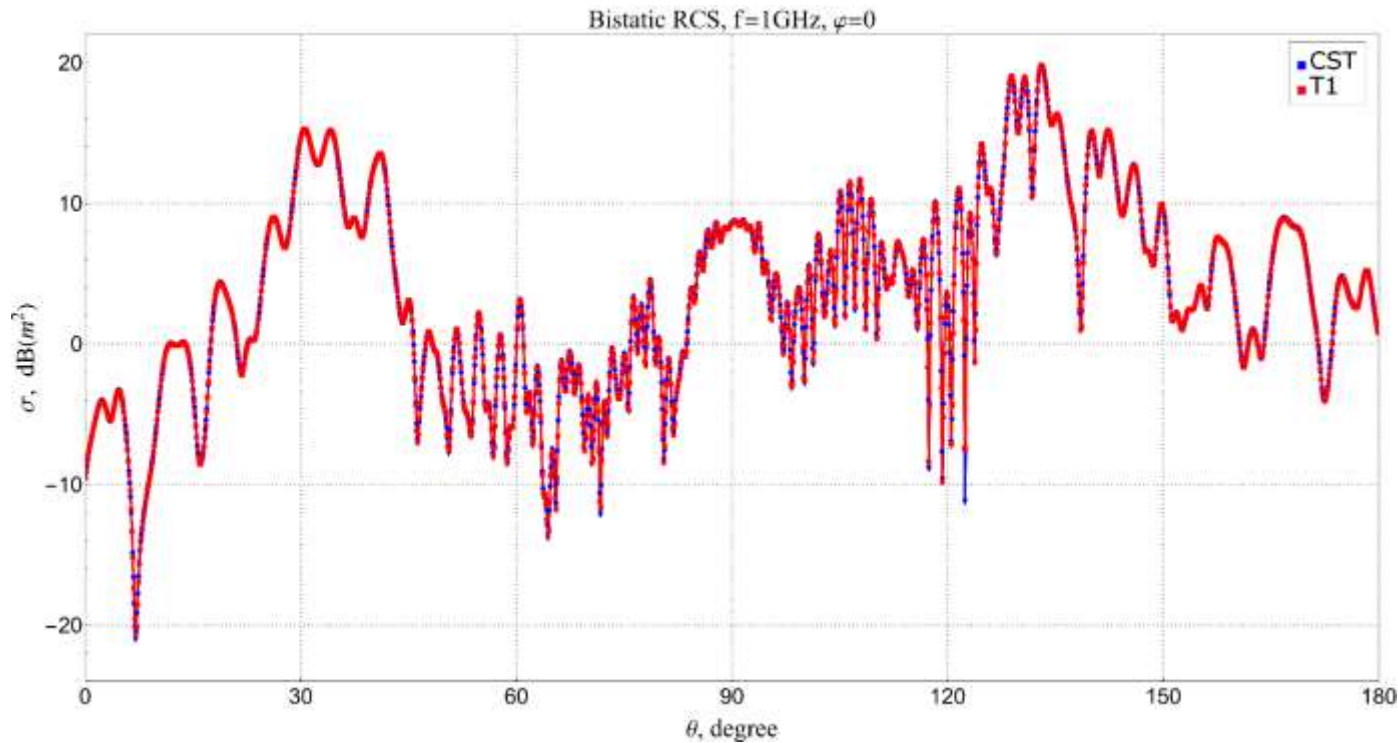


Расчет по T1



Расчет по CST

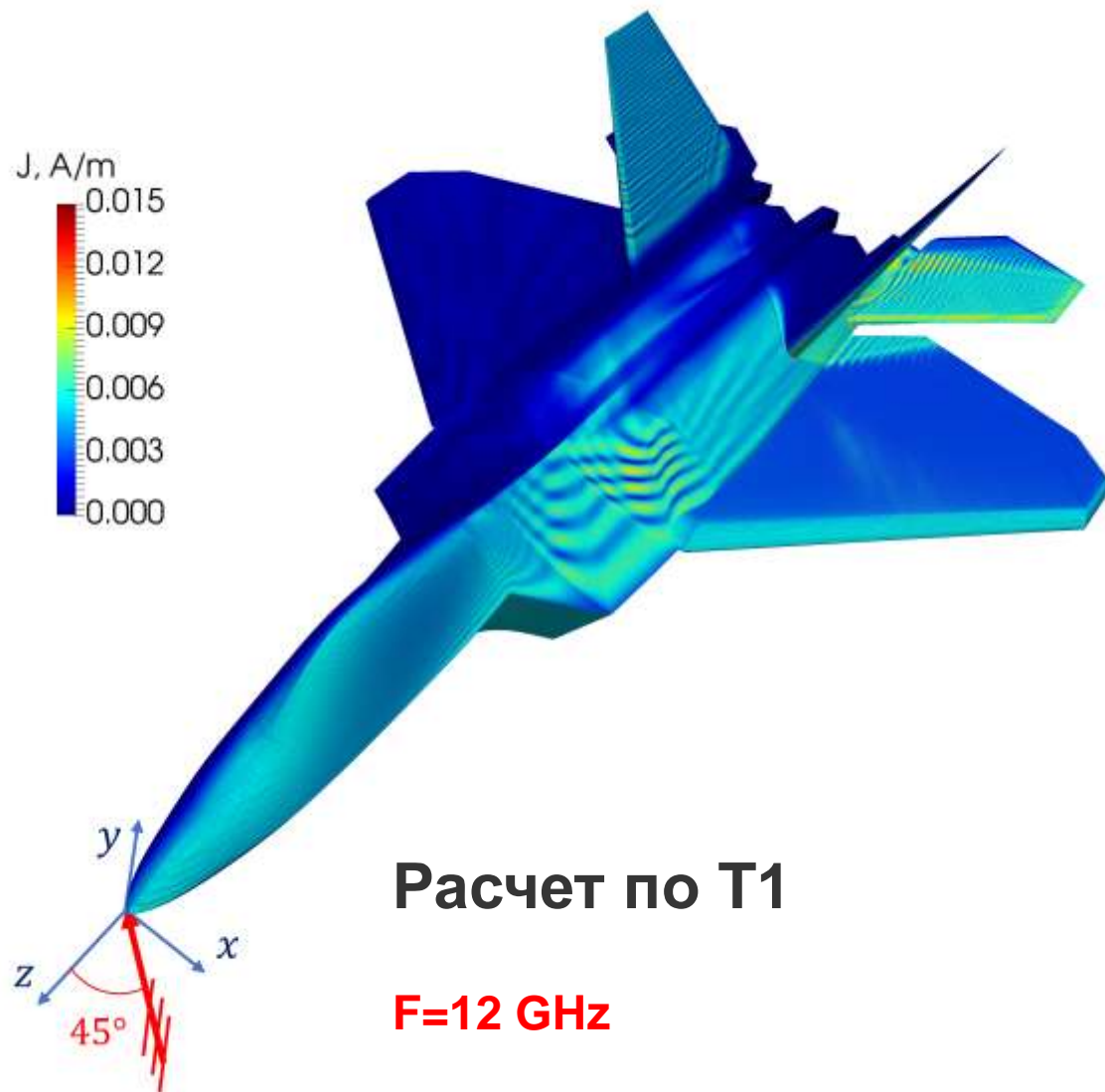
# Бистатистическая ЭПР (1 GHz)



$$\sigma = 10 \lg \left( 4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2} \right), \text{dB}(m^2)$$

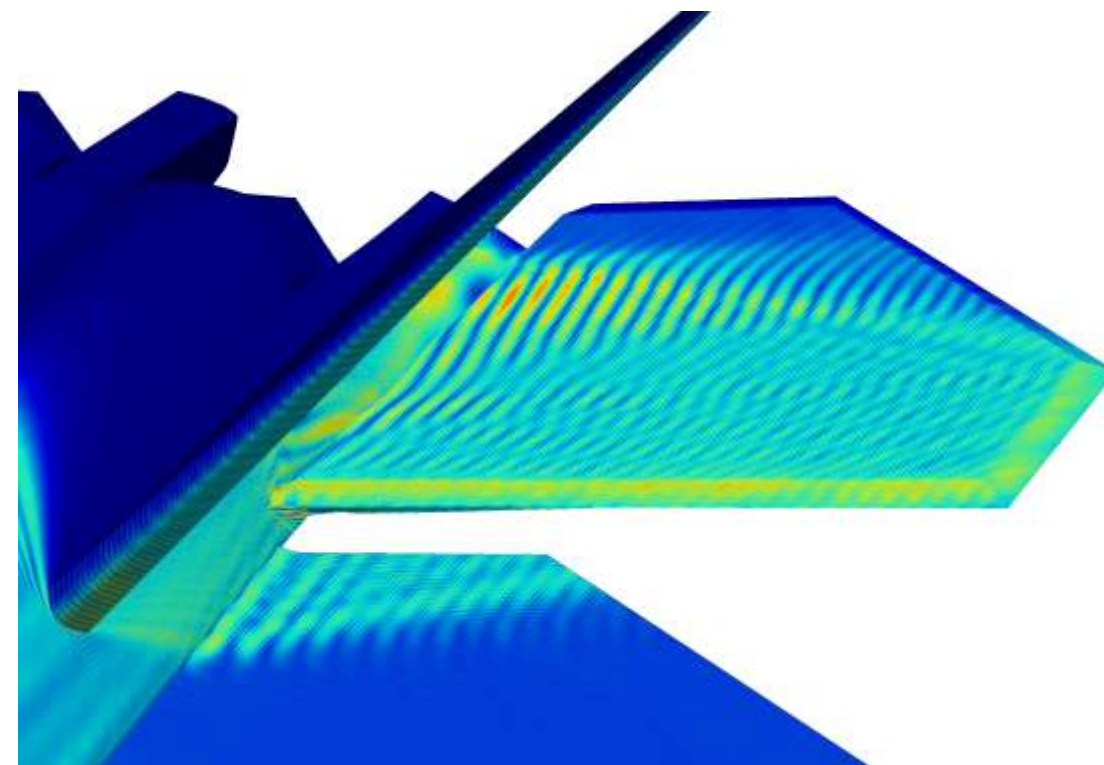
$R$  – расстояние до РЛС,  $E_1$  – напряженность поля волны в месте объекта,  $E_2$  – напряженность поля отраженной волны в месте РЛС

# Рассеяние плоской волны (12 GHz) на объекте



Расчет по T1

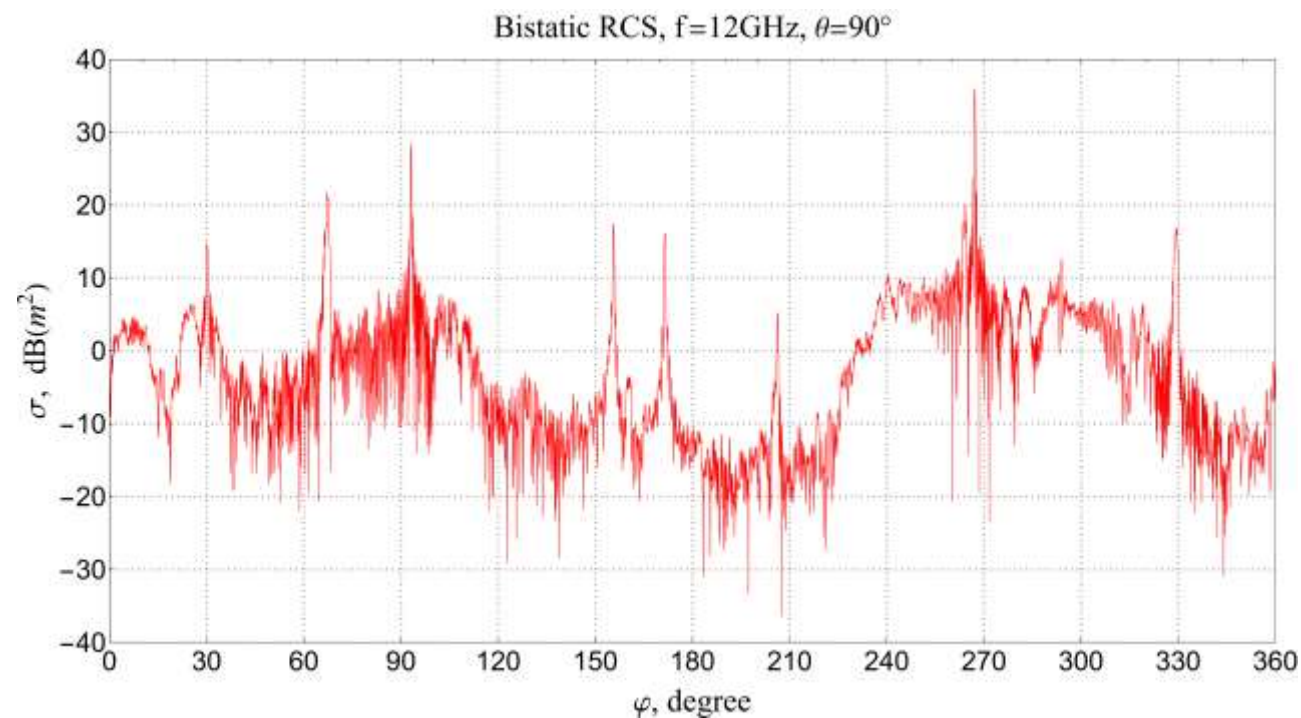
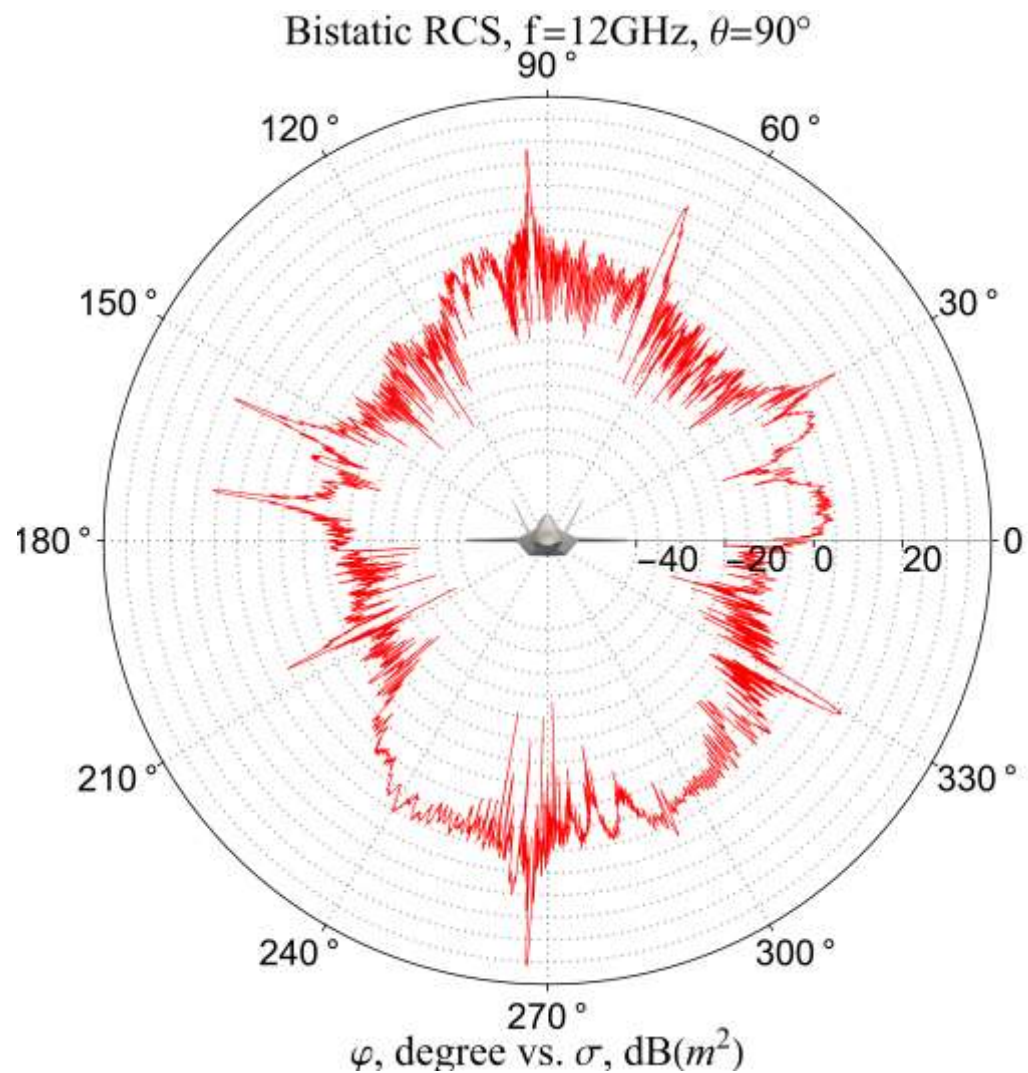
**F=12 GHz**

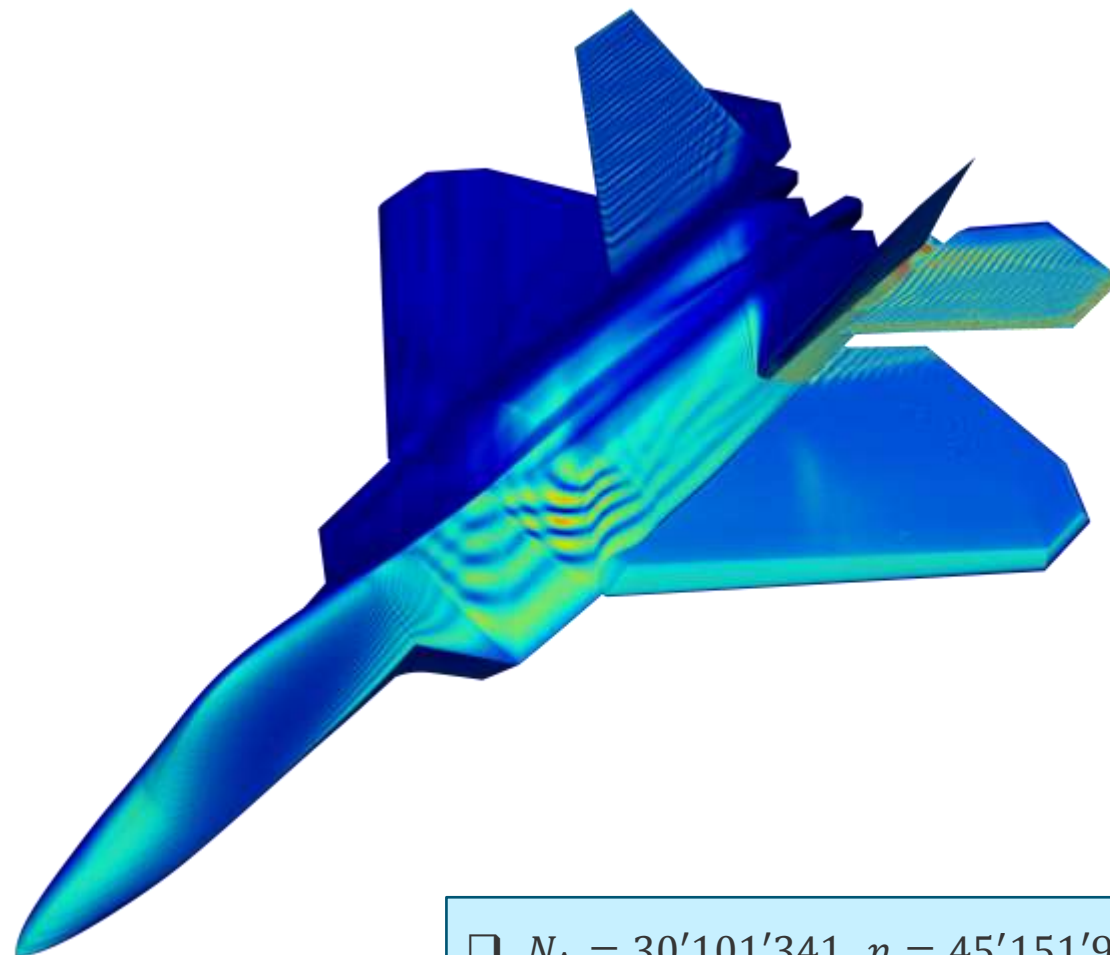
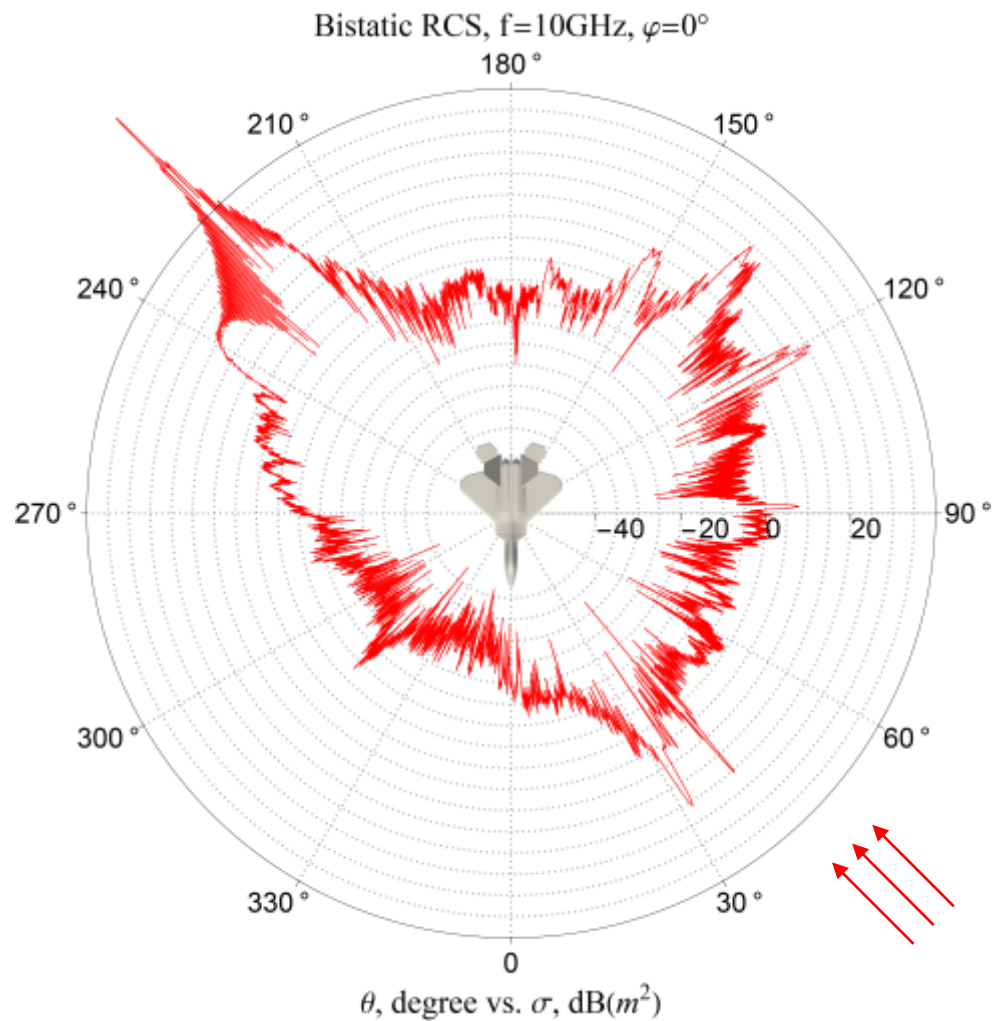


6 млн элементов, 54 млн (!!!) неизвестных,  
12 ГГц,  
20.5 часов расчета,  
2.9 Тб памяти.



# Бистатистическая ЭПР (12 GHz)





□  $N_{\Delta} = 30'101'341$ ,  $n = 45'151'942$

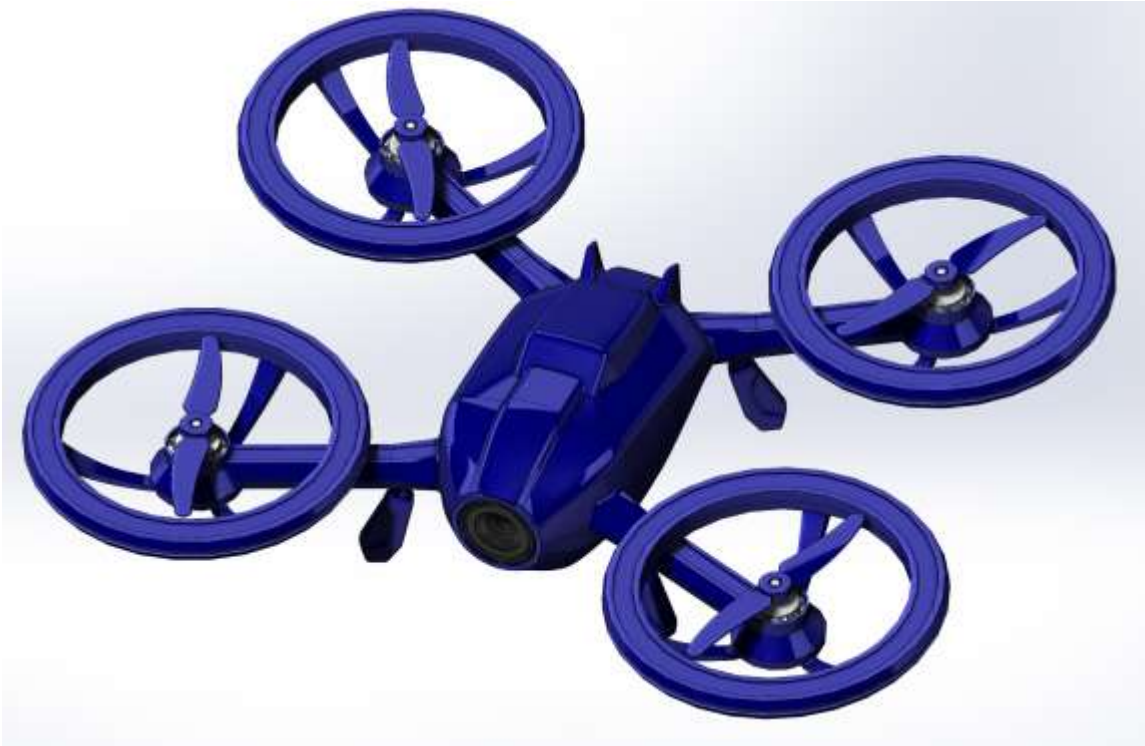
□  $T = 19$  часов,  $M = 2.3 \text{ Тб}$

# Сравнение производительности и требований по памяти с CST



Число элементов	Частота, ГГц	T1		CST	
		Время, с	Память, Гб	Время, с	Память, Гб
Сфера ( $\varepsilon_{tol} = 10^{-4}$ )					
61.4k	2.5	20	3.4	34	2.0
127k	3.54	43	6.7	76	3.5
253k	5	105	14	166	6.8
507k	7.07	235	27	355	13
1029k	10	597	59	788	26
2009	14.14	1371	113	1723	52
F-22 ( $\varepsilon_{tol} = 10^{-3}$ )					
1602k	1.5	765	79	2792	81
6000k	12	73800	2900	не сошелся	не сошелся

# Расчет рассеяния плоской электромагнитной волны на объекте с диэлектриками

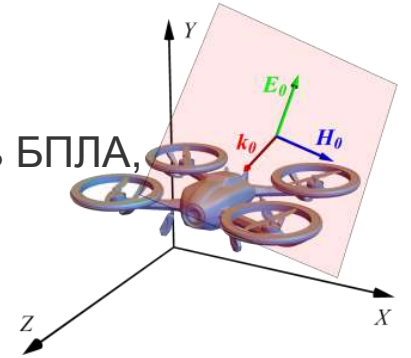


Параметры расчета:

*Объект* – полномасштабная модель БПЛА,

*Материал:*

- 1) внешний домен - вакуум
- 2) корпус и пропеллеры, синий цвет - углепластик
- 3) камера, черный цвет -  $\epsilon_{\text{re}}=3.8$ ,  $\tan_{\text{delta}}=0.02$
- 4) моторчики, серый цвет - PEC, идеальный проводник



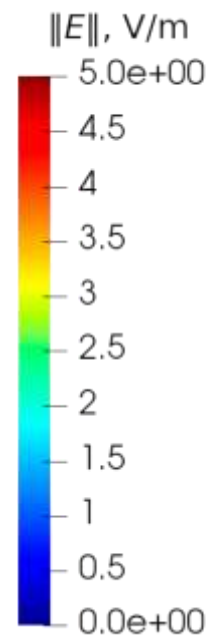
*Падающая электромагнитная волна* – плоская с частотой 1 ГГц, падающая под углом  $45^\circ$  к оси объекта в плоскости планера



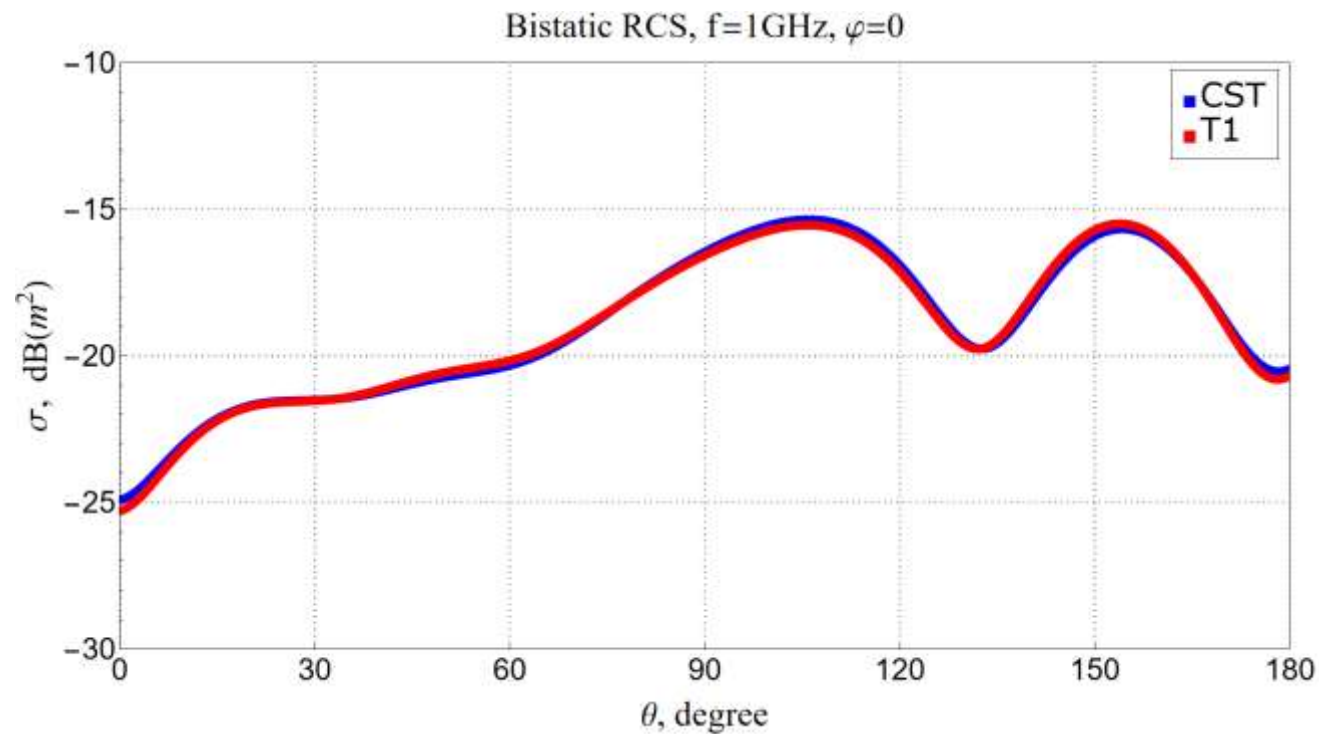
Напряженность электрического поля на поверхности.



*CADFlo*



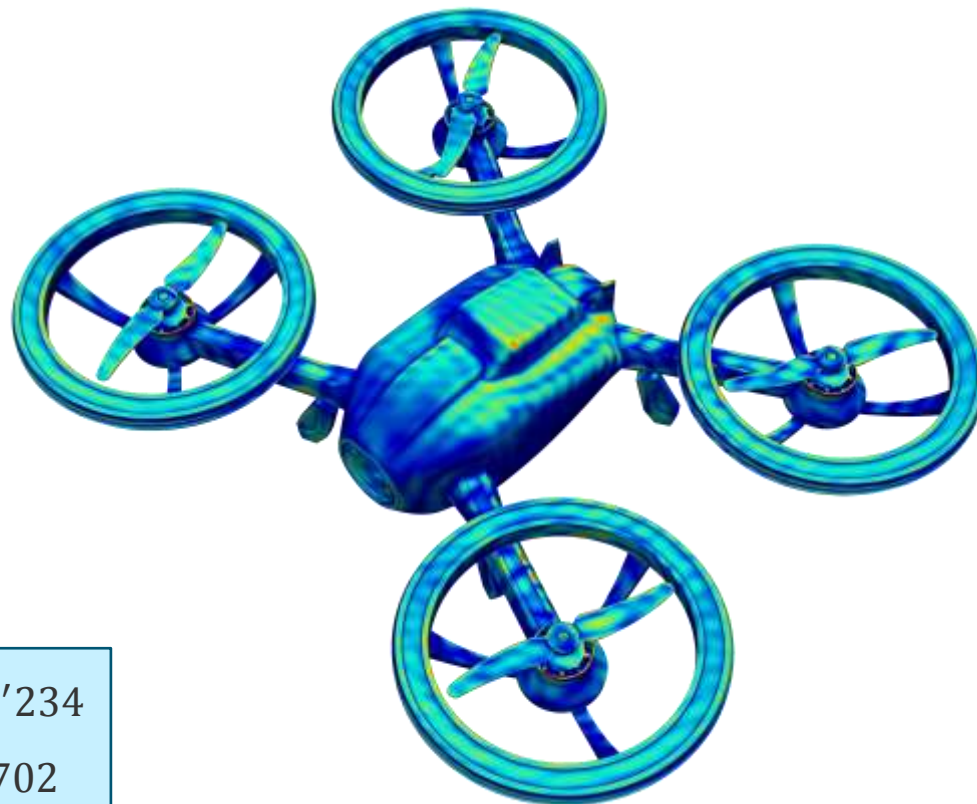
*CST*



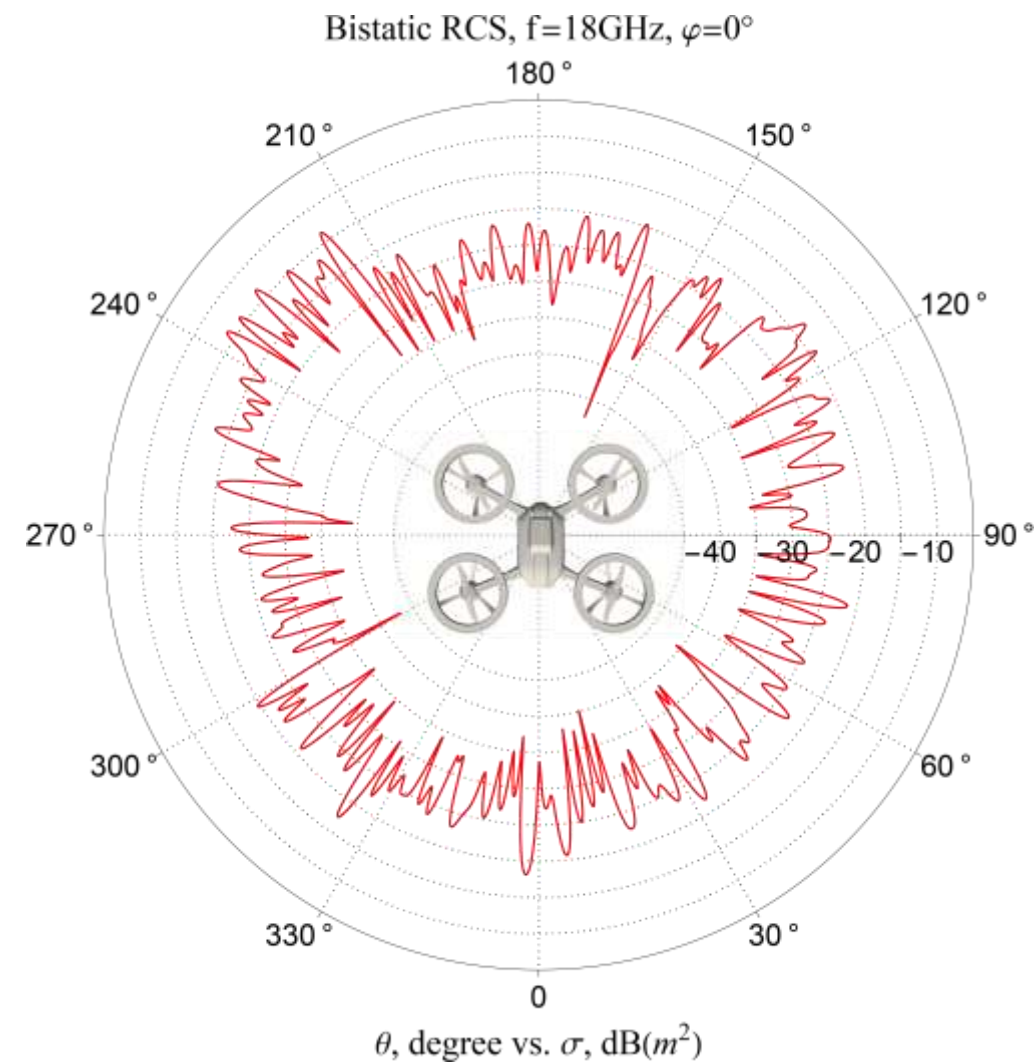
	CADFLO	CST
Сетка (одинаковая)	100 000	100 000
Память, Гб	15	72
Время расчета, сек	143	24800

CADFLO считает 170 раз быстрее, чем CST (при наличии диэлектриков) при той же точности

# Дрон, 18 ГГц



- $N_{\Delta} = 10'169'234$
- $n = 30'507'702$
- $T = 13$  часов
- $M = 1.3$  Тб



- + Реализован численный метод решения интегральных уравнений электродинамики для диэлектриков и идеальных проводников
- + Продемонстрирован 2-й порядок сходимости численной схемы
- + Сравнение производительности с CST показало значительное ускорение расчета при сопоставимой точности
- + Проиллюстрирована возможность решения электрически больших задач с десятками миллионов неизвестных
- + Разработанный алгоритм и метод решения продуктизируется в CADFLO



