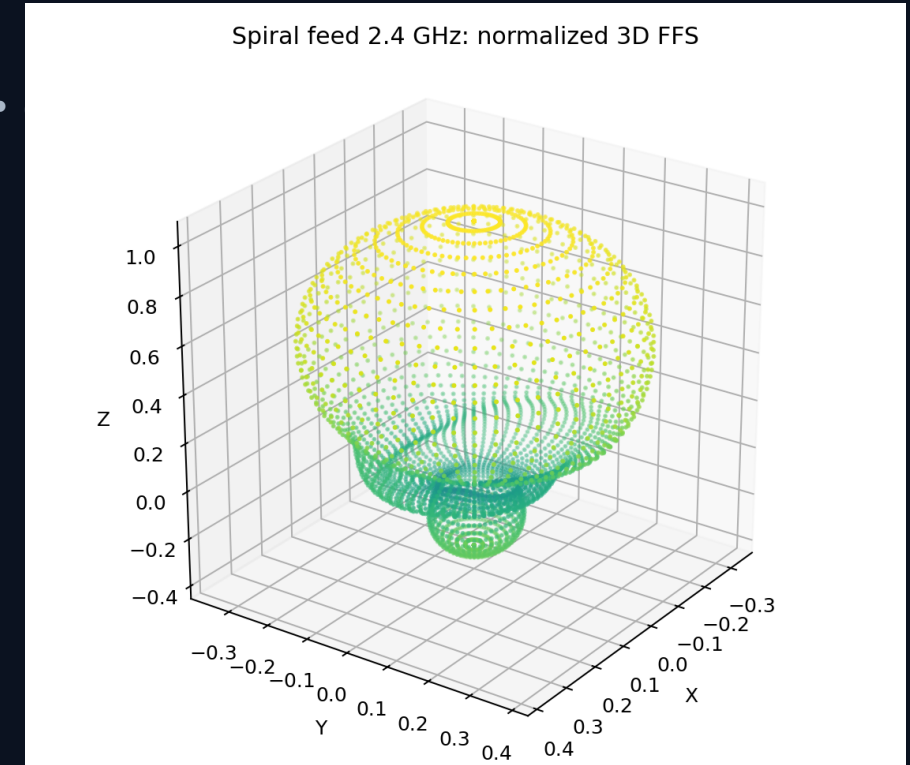


Фазовый анализ облучателя параболической антенны по CST FFS

Геометрия • spillover • taper • фазовый центр • поляризация • η_{phase} •

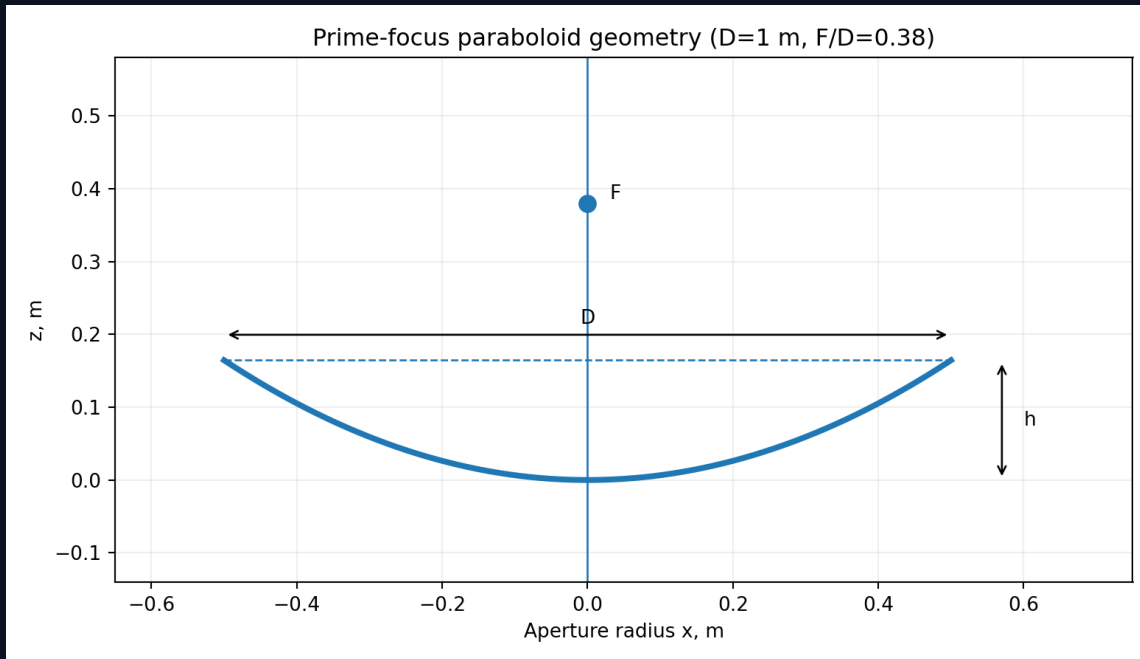
**Практический алгоритм, реализованный в CST FFS Antenna
Calculator v1.8.9**

Контрольные данные: 1.3 ГГц feed + spiral 2.4 ГГц



1. Зачем нужна фазовая проверка

Амплитуда отвечает на вопрос «сколько энергии попало на зеркало», фаза — «сложится ли она когерентно в раскрыве»

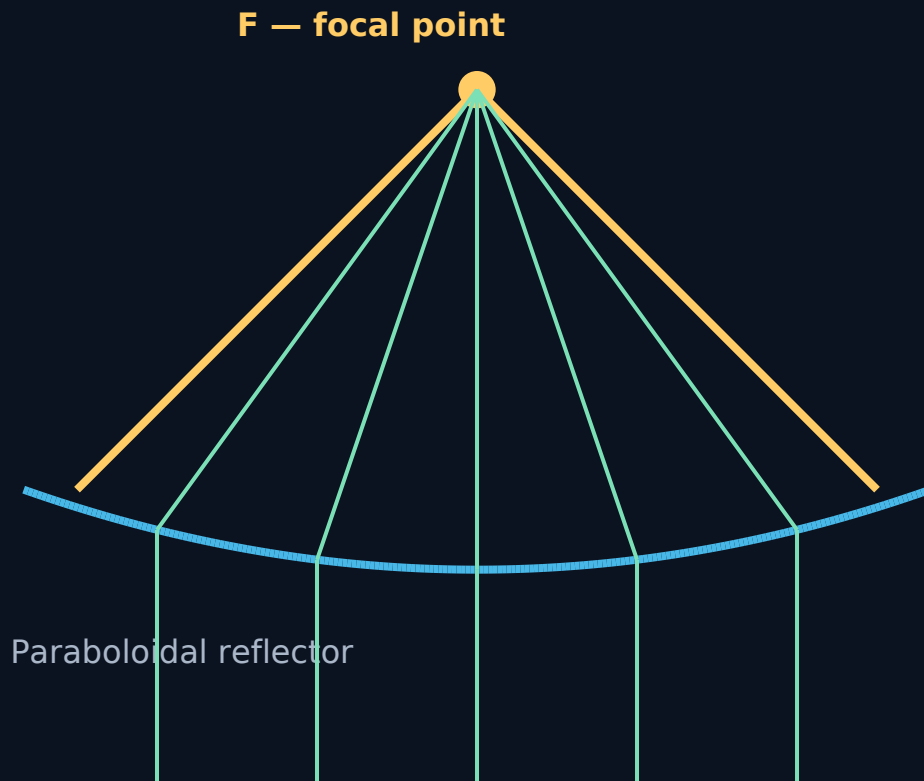


- Идеальный параболоид превращает сферическую волну из фокуса в почти плоский фазовый фронт.
- Ошибка положения фазового центра создаёт систематическую фазовую кривизну по раскрытию.
- Даже при хорошем spillover и taper фазовая ошибка может заметно уменьшить усиление.
- Поэтому η_{phase} должна учитываться отдельно от η_{spill} , η_{taper} и η_{Ruze} .

$$\eta_{\text{ap}} = \eta_{\text{spill}} \cdot \eta_{\text{taper}} \cdot \eta_{\text{phase}} \cdot \eta_{\text{Ruze}}$$

2. Что говорит классическая литература

Схемы ниже перерисованы по классическим источникам, чтобы сохранить единый стиль и читаемость



Ключевые выводы

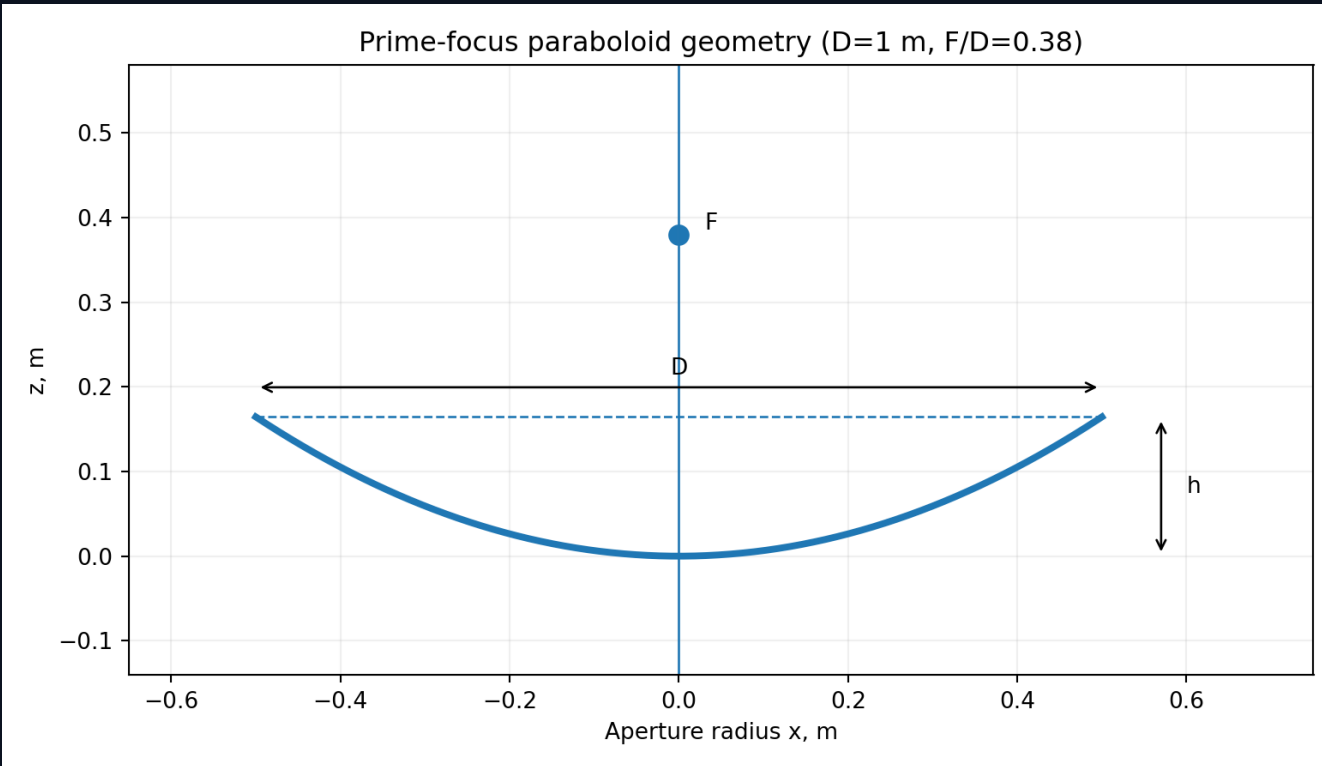
- Все лучи от идеального фокуса имеют одинаковый оптический путь до плоскости раскрыва.
- Реальная диаграмма определяется конечной апертурой, распределением облучения, блокировкой и фазовым центром feed.
- Ludwig-3 — стандартная практическая база для определения co/cross-поляризации антенных диаграмм.

Литература:

A.C. Ludwig, IEEE TAP, 1973; NASA NTRS 19730033397
NASA TP-2001-210831; NASA reflector/feed design reports

3. Геометрия параболоида

Формулы, используемые в приложении



$$F = D \cdot (F/D)$$

$$h = D^2 / (16F)$$

$$\theta_{\text{edge}} = 2 \operatorname{atan}[D / (4F)]$$

$$A = \pi D^2 / 4$$

$$D_{\text{ideal}} = (\pi D / \lambda)^2$$

Одинаковый масштаб X:Z важен и для визуальной проверки геометрии.

4. Что реально хранится в CST FFS

Комплексное поле — это не только диаграмма мощности

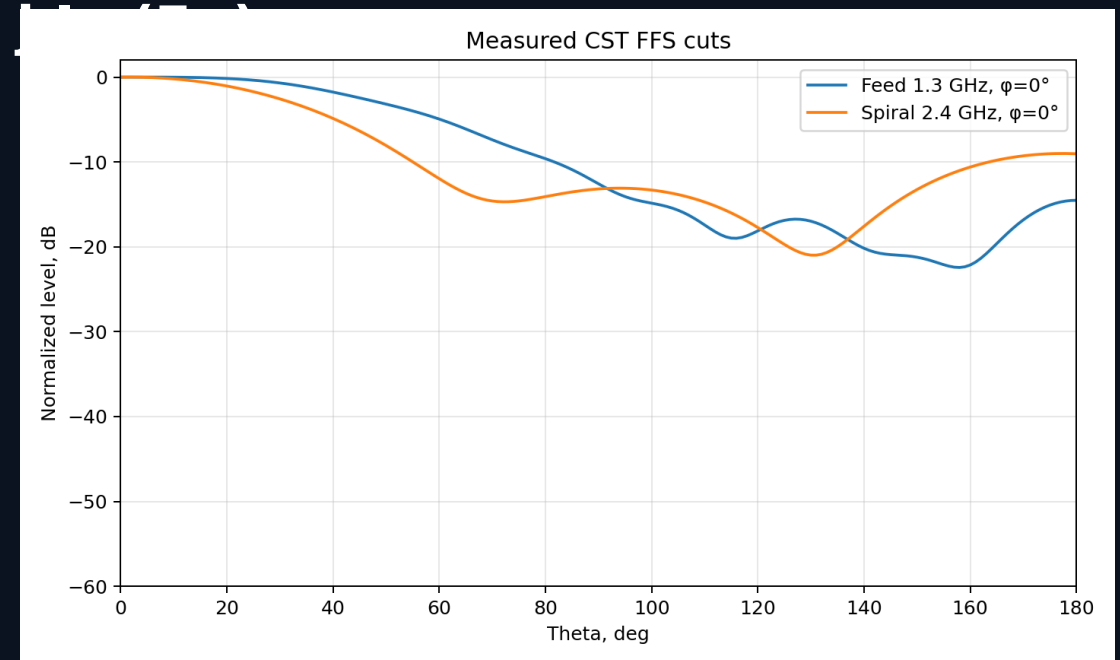
$$E_{\theta} = \text{Re}(E_{\theta}) + j \cdot \text{Im}(E_{\theta})$$

$$E_{\phi} = \text{Re}(E_{\phi}) + j \cdot \text{Im}(E_{\phi})$$

$$U = |E_{\theta}|^2 + |E_{\phi}|^2$$

FFS v3.0 также содержит:

- частоту и мощности Radiated / Accepted / Stimulated;
- угловую сетку Phi × Theta;
- комплексные компоненты E_{θ} и E_{ϕ} — следовательно, фазу;
- ориентацию локальных осей источника.



5. Поляризация: почему нельзя анализировать только E_θ

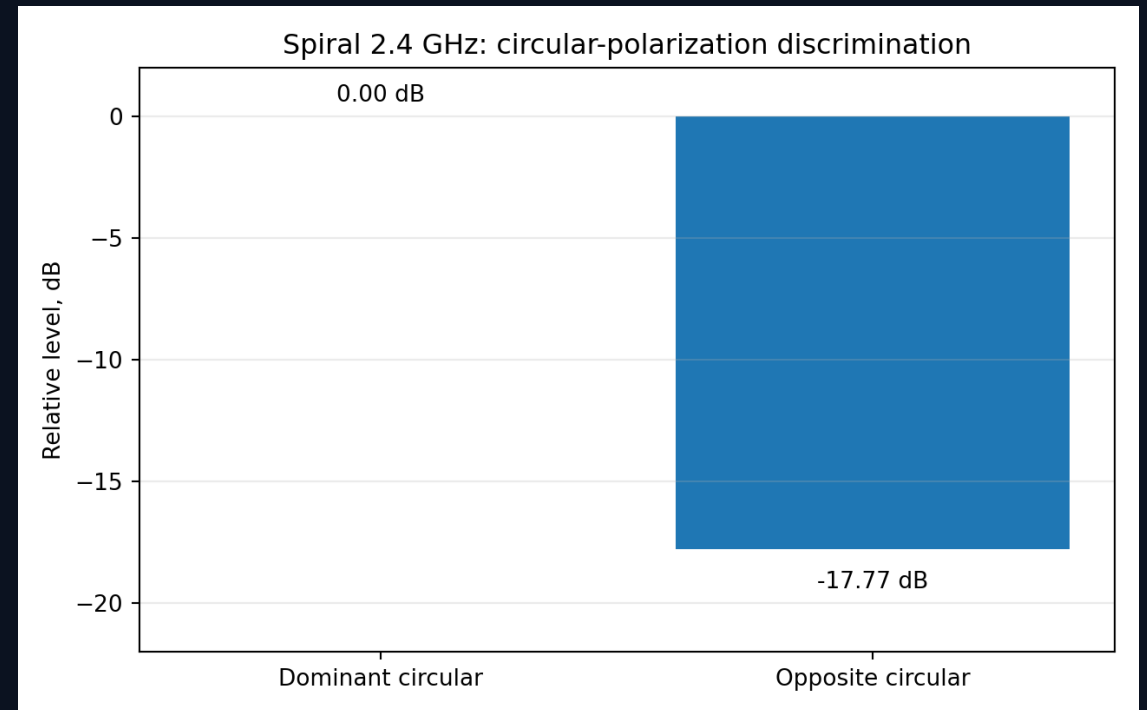
Сферический базис вращается с φ ; для корректной co/cross-фазы нужен устойчивый базис

$$E_{co} = E_\theta \cos\varphi - E_\varphi \sin\varphi$$

$$E_{cross} = E_\theta \sin\varphi + E_\varphi \cos\varphi$$

$$E_{R,L} = (E_{co} \mp j \cdot E_{cross})/\sqrt{2}$$

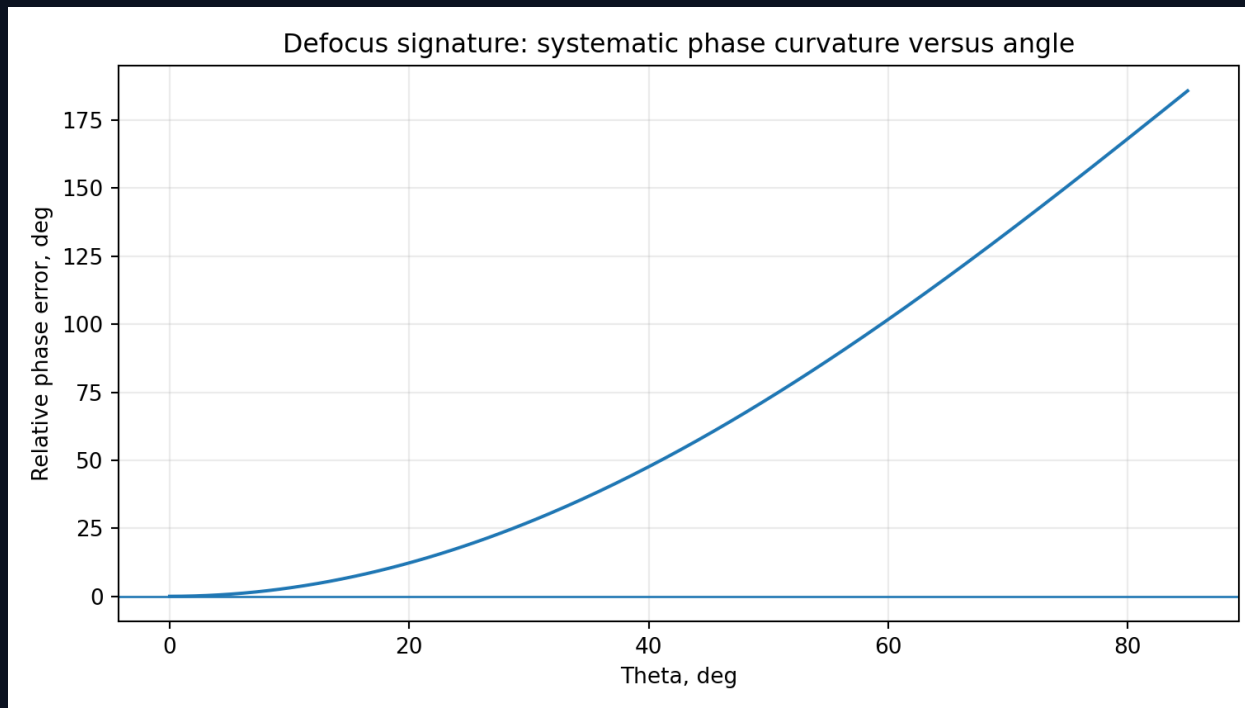
Алгоритм автоматически сравнивает линейные и круговые компоненты и выбирает доминирующую.



Spiral 2.4 GHz: доминирующая круговая компонента ≈ 17.77 dB выше противоположной.

6. Фазовый центр как задача когерентности

Не разворачиваем фазу вручную — максимизируем комплексную когерентную сумму



$$C(z) = |\sum w_i E_i \cdot \exp(jk z \cos\theta_i)|$$

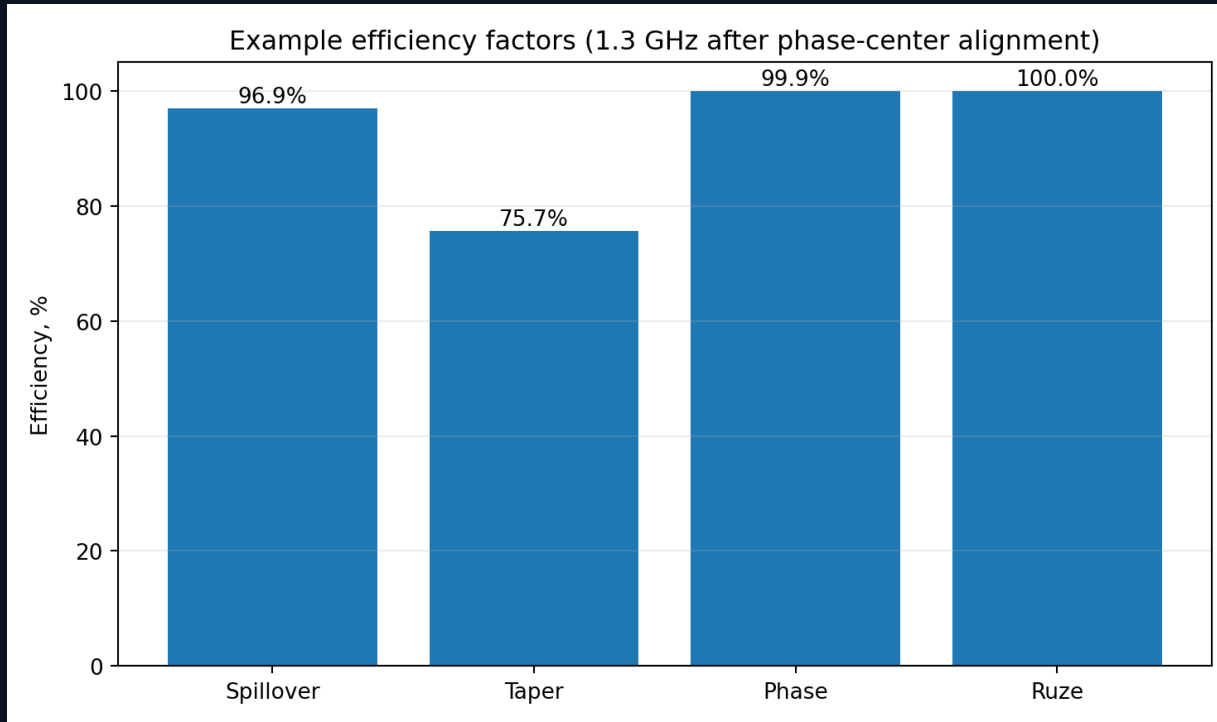
$$\eta_{\text{phase}}(z) = |\sum w_i E_i|^2 / [(\sum w_i)(\sum w_i |E_i|^2)]$$

Поиск Z:

- грубый поиск в диапазоне $\pm 2\lambda$;
- локальное уточнение около максимума;
- контроль, что максимум не уперся в границу;
- остаточная фаза $\rightarrow$ RMS и max error.

7. Бюджет эффективности раскрыва

Каждый множитель отвечает за отдельный физический механизм потерь



$$\eta_{ap} = \eta_{spill} \cdot \eta_{taper} \cdot \eta_{phase} \cdot \eta_{Ruze}$$

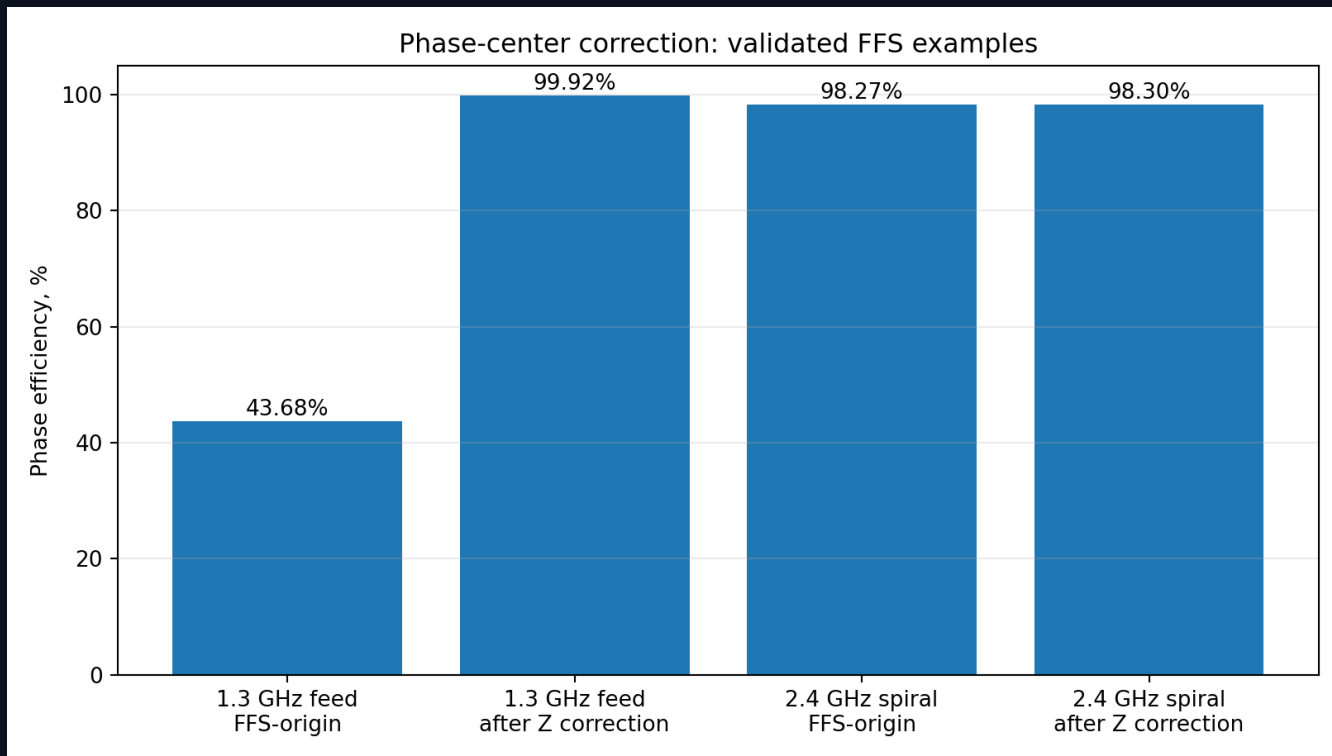
$$G \approx \eta_{rad} \cdot \eta_{ap} \cdot (\pi D / \lambda)^2$$

Что ещё не включено полностью:

- блокировка feed/растяжками;
- полная векторная cross-pol эффективность зеркала;
- структурное рассеяние и кромочные эффекты;
- полноволновая взаимная связь feed ↔ reflector.

8. Проверка алгоритма на трёх независимых случаях

Синтетический тест + два реальных CST FFS



Синтетический контроль

Задано $Z = +50.000$ мм

Найдено $Z = +50.000$ мм

После коррекции $\eta_{\text{phase}} = 100.000\%$

Spiral 2.4 GHz

$Z_{\text{phase}} \approx +0.60$ мм

$\eta_{\text{phase}}(\text{origin}) \approx 98.27\%$

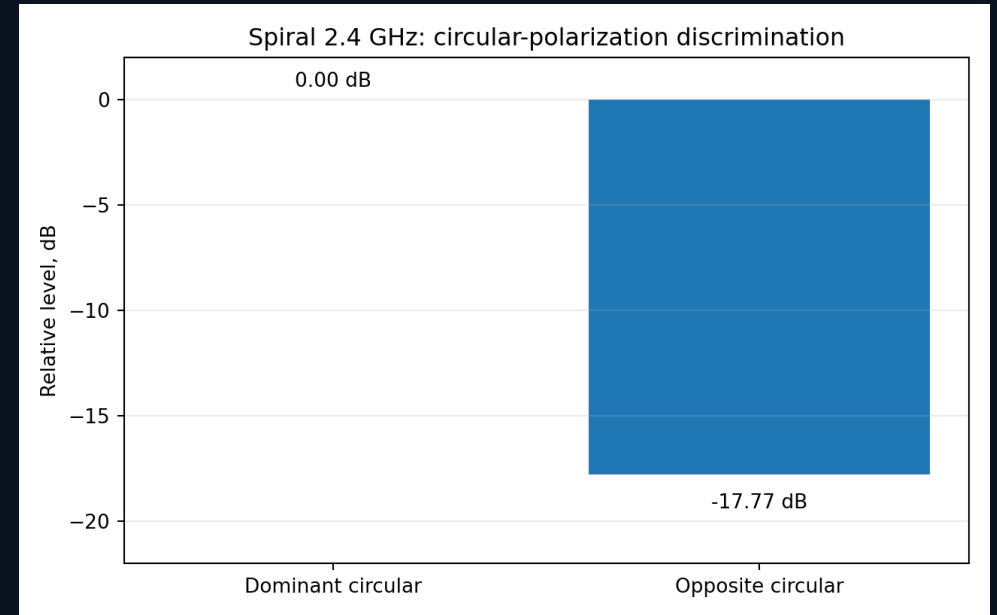
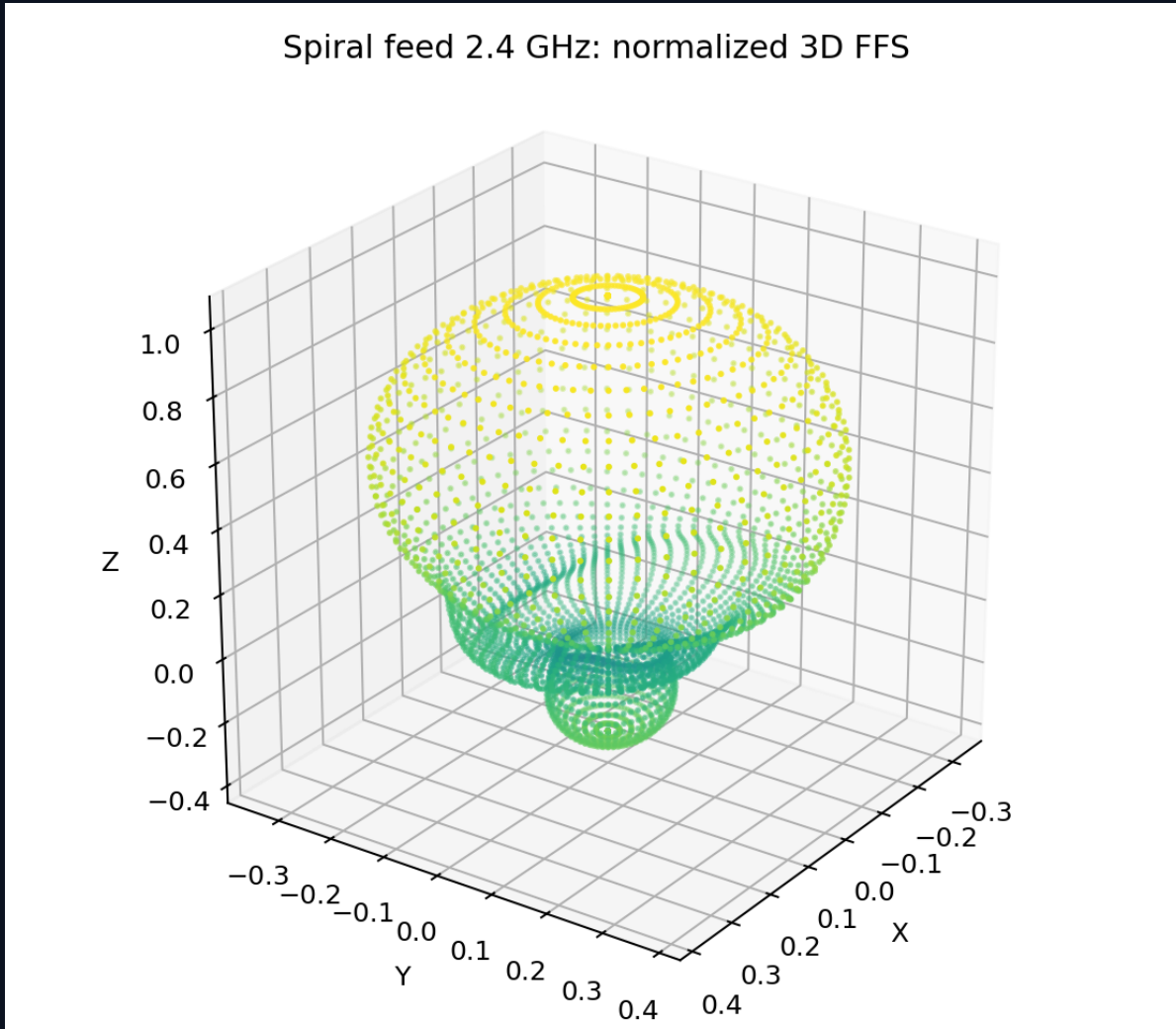
Feed 1.3 GHz

$Z_{\text{phase}} \approx +129.52$ мм

η_{phase} : 43.68% → 99.92% после совмещения

9. Контрольный FFS: спираль 2.4 ГГц

Файл особенно полезен для проверки круговой поляризации и фазового центра



CST FFS v3.0 • $361 \times 181 = 65\,341$ samples

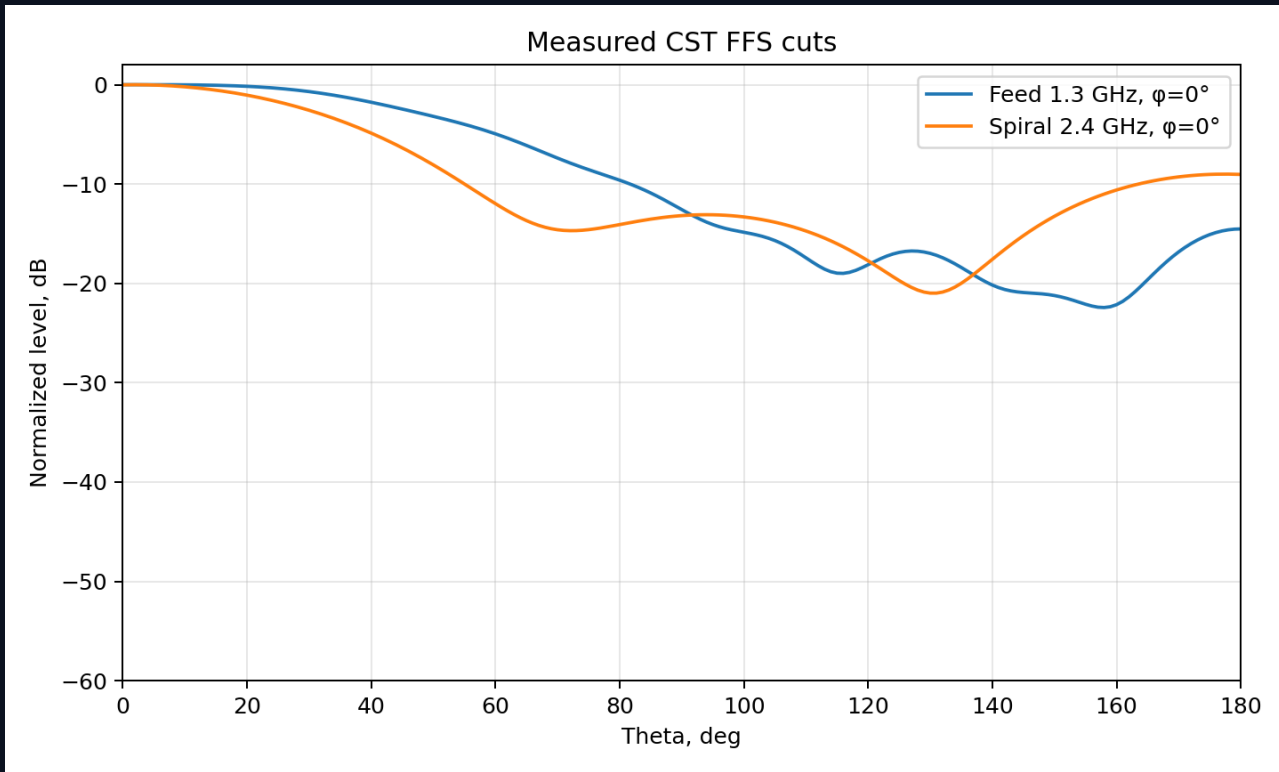
После исключения $\varphi=360^\circ$: 65 160 точек

Максимум полной мощности: $\theta \approx 2^\circ$, $\varphi \approx 35^\circ$

Circular discrimination ≈ 17.77 dB

10. Контрольный FFS: feed 1.3 ГГц

Пример, где фазовый центр существенно смещён относительно FFS-origin



До коррекции фазового центра

$\eta_{\text{phase}} \approx 43.68\%$ (≈ -3.60 dB)

Оптимум

$Z_{\text{phase}} \approx +129.52$ мм

После совмещения

$\eta_{\text{phase}} \approx 99.92\%$

Практический смысл: FFS-origin и фазовый центр — не обязательно одна и та же точка.

11. Алгоритм приложения v1.8.9

Поток обработки без загрузки всего FFS в память

1

Чтение FFS

частота, power, Phi/Theta, комплексные E_θ/E_ϕ

2

Поляризация

Ludwig-3 + выбор dominant linear/circular

3

Геометрия

D, F/D, θ_{edge} , mapping $\theta \rightarrow \text{aperture}$

4

Амплитуда

spillover + taper

5

Фаза

Zphase + RMS + $\eta_{\text{phase}}(\text{origin/optimum})$

6

Система

η_{ap} , directivity/gain estimate, 2D/3D визуализация

12. Как интерпретировать результаты

Фазовый центр — диагностический параметр установки, а не «магическая поправка усиления»

- $\eta_{\text{phase}}(\text{origin})$ показывает фактическую фазовую эффективность, если FFS-origin установлен в геометрическом фокусе.
- Zphase показывает, куда смещён эффективный фазовый центр относительно origin FFS.
- $\eta_{\text{phase}}(\text{optimum})$ показывает потенциальную эффективность после правильного совмещения фазового центра с фокусом.
- Нельзя автоматически подставлять $\eta_{\text{phase}}(\text{optimum})$ в текущий Gain, если feed физически ещё не перемещён.
- Высокая η_{phase} не отменяет плохой taper, spillover, cross-pol или ошибки поверхности.

Правильная установка: геометрический фокус зеркала ↔ найденный phase center feed

13. Границы применимости

Что можно считать уверенно, а где нужен полный электромагнитный расчёт

Хорошо подходит

- prime-focus reflector и известная ось feed;
- сравнение нескольких FFS/частот;
- поиск осевого phase center Z;
- оценка spillover/taper/phase/Ruze;
- предварительная оптимизация положения облучателя.

Требует осторожности / CST full model

- сильный off-axis phase center (X/Y);
- offset reflector;
- сильная cross-pol / сложная эллиптическая поляризация;
- blockage и scattering растяжек;
- feed-reflector coupling и near-field эффекты.

14. Литература и источники

Основные источники, на которых основана методика и терминология

1. A. C. Ludwig, "The Definition of Cross Polarization", IEEE Trans. Antennas Propagation, AP-21, 1973.
2. NASA NTRS 19730033397 — запись и библиографические данные статьи Ludwig.
3. NASA TP-2001-210831 — анализ параболического отражателя: фокус, равенство путей, дифракция и реальные потери.
4. NASA reflector antenna design studies (NTRS 19750006868) — spillover, cross-polarization и trade-offs.
5. Antenna-Theory.com — Parabolic Dish Reflector Antenna, aperture taper / spillover / other efficiencies.
6. SIMULIA / Dassault Systèmes — CST Studio Suite antenna simulation and farfield-source workflow.
7. CST FFS v3.0 files пользователя: UA1FAD_23cm_FEED.ffs; spiral_3_vitka_2_4GHz(1).ffs.

Примечание: технические схемы в презентации перерисованы по литературным источникам; графики FFS и численные результаты построены из предоставленных файлов.