

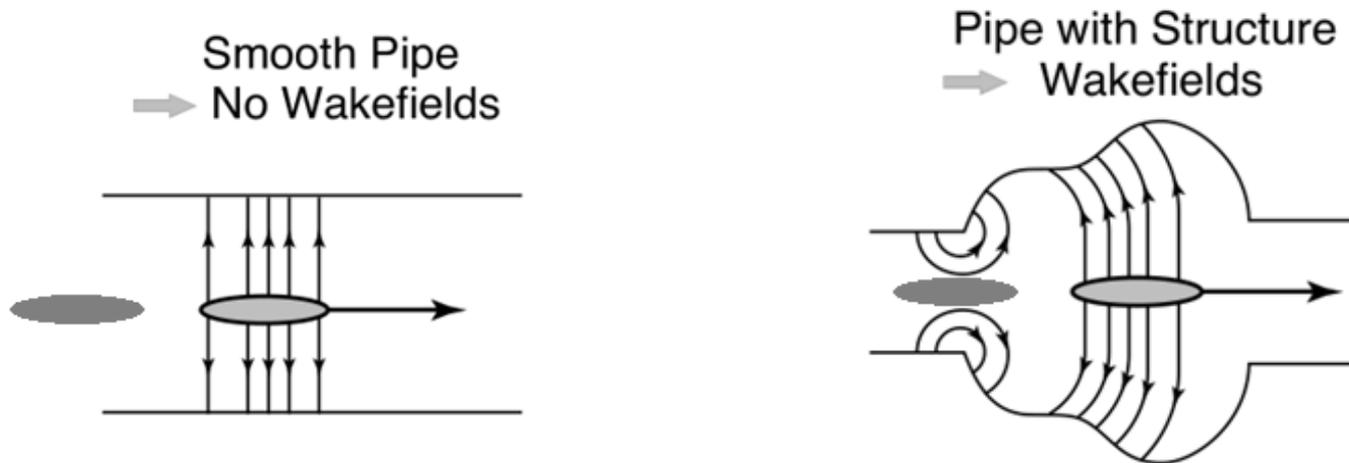


Моделирование динамики интенсивного пучка протонов в коллайдере NICA

Маргарита Юрьевна Коробицина (JINR)
Александр Дмитриевич Коваленко (JINR)
Андрей Антонович Коломиец (ITER)

Дубна, 2019

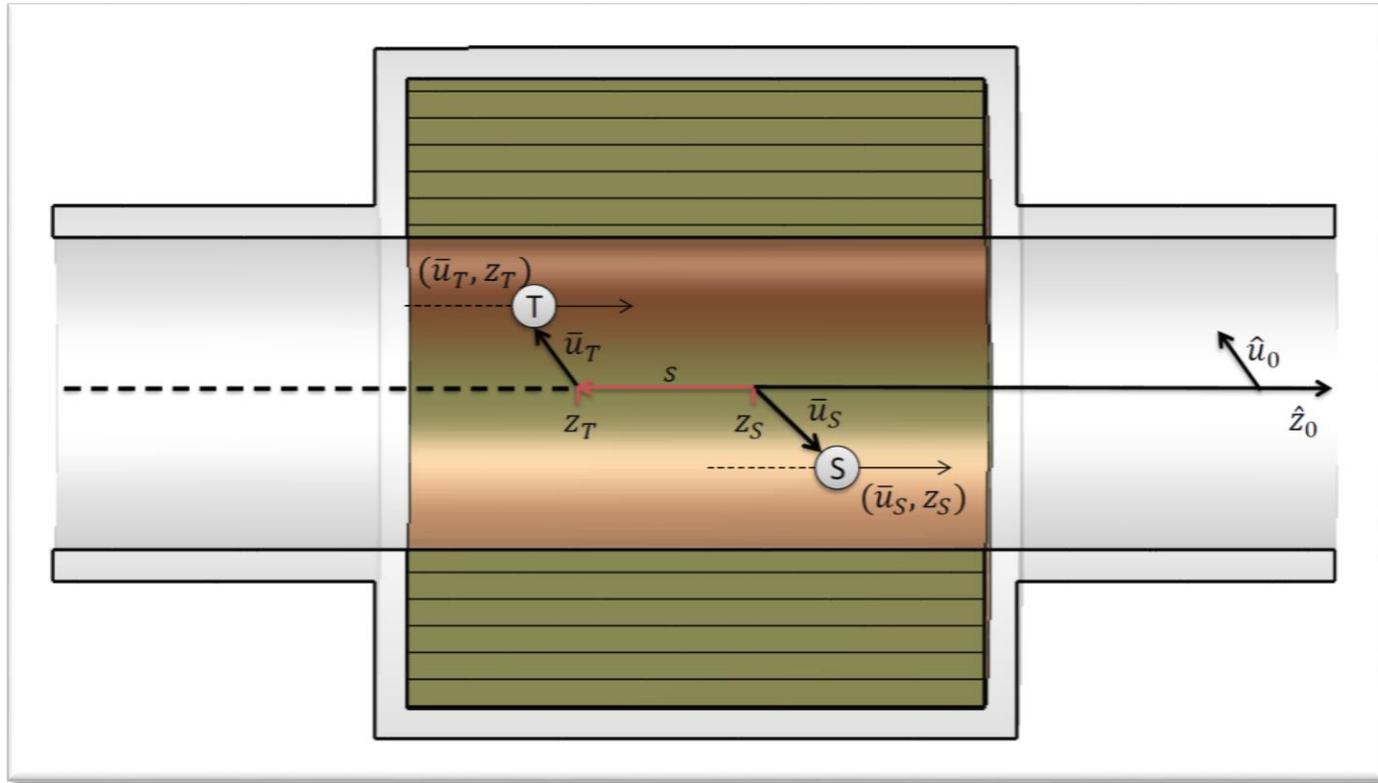
- ☀ wake - поле
- ☀ неустойчивость в продольном и поперечном направлении
- ☀ импеданс



Структура доклада

- ✱ **Часть 1:** описание физики движения пучка в камере ускорителя.
- ✱ **Часть 2:** метод моделирования импеданса.
- ✱ **Часть 3:** примеры расчета импеданса для элементов регулярного периода арки коллайдера NICA.
- ✱ **Выводы и перспектива.**

Часть 1



S- исходная частица, **T**- тестовая частица

$\hat{u} = u\hat{u}_0$ – поперечная координата

$\hat{z} = z\hat{z}_0$ – продольная координата

Координаты тестовой частицы (\hat{u}_T, z_T)

Координаты исходной частицы $(\hat{u}_S, z_S = \beta ct)$

Часть 1

$$\Delta \bar{p}(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{F}(\bar{u}_S, \bar{u}_T, z_T = z_S - s, z_S) dt \quad 1.1$$

$\bar{F} = q(\bar{E} + \beta \mu_0 c \hat{z}_0 * \bar{H})$ – результирующая сила

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума

q – заряд частицы

$$\Delta p_l(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_l(\bar{u}_S, \bar{u}_T, z_T) dt \quad 1.2$$

$$\Delta p_t(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) = q \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{u}_0 * E_l(\bar{u}_S, \bar{u}_T, z_T, z_S) + \beta \mu_0 c \hat{z}_0 * H_t(\bar{u}_S, \bar{u}_T, z_T, z_S) dt$$

$$z_S = \beta c t$$

$$z_T = z_S - s$$

Продольная wake-функция:

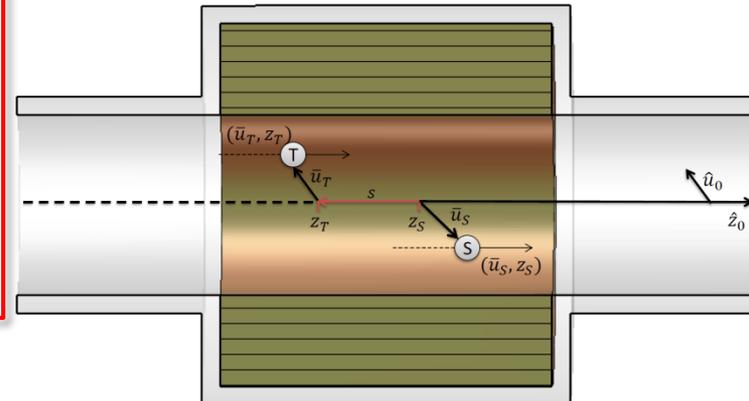
$$W_l(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) = -\frac{\beta c}{qQ} \Delta p_l(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) \quad 1.3$$

Поперечная wake-функция:

$$W_t(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) = -\frac{\beta c}{qQ} \Delta p_t(\bar{u}_S, \bar{u}_T, s) \quad 1.4$$

q – заряд тестовой частицы

Q – заряд исходной частицы



Часть 1

Рассматривая движение частиц, движущихся по невозмущенной траектории, , т.е.

$$\bar{\mathbf{u}}_S = \mathbf{0}$$

$$\bar{\mathbf{u}}_T = \mathbf{0}$$

Разложение в первом приближении поперечной вэйк-функции по координатам частиц приводит к выражению:

$$W_t(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{u}}_T, \mathbf{s}) \approx W_t(\bar{\mathbf{0}}, \bar{\mathbf{0}}, \mathbf{s}) + \Delta_t W_t(\bar{\mathbf{0}}, \bar{\mathbf{u}}_T, \mathbf{s}) \bar{\mathbf{u}}_S + \Delta_t W_t(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{0}}, \mathbf{s}) \bar{\mathbf{u}}_T \quad 1.5$$

Первый член разложения = 0.

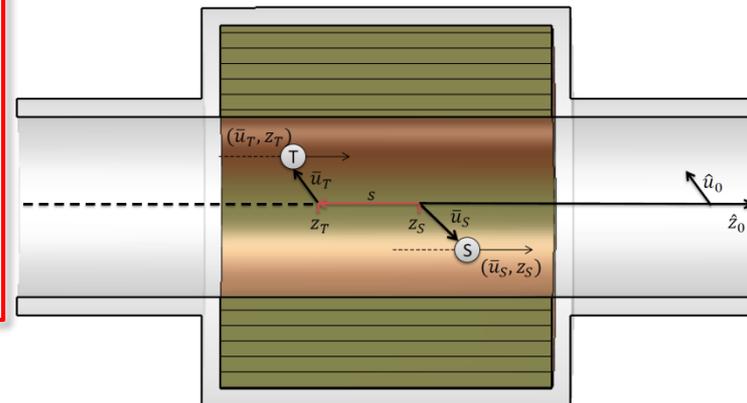
Второй в англо-язычной литературе называется - **driving** (или дипольное) wake-поле.

Третий называется **detuning** (или квадрупольное) wake-поле.

Продольный и поперечный импеданс определяется как Фурье преобразование соответствующих wake-полей:

$$Z_l(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{u}}_T, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_l(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{u}}_T, \mathbf{s}) e^{\frac{j\omega s}{\beta c}} \frac{ds}{\beta c} \quad 1.6$$

$$Z_t(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{u}}_T, \omega) = -j \int_{-\infty}^{+\infty} W_t(\bar{\mathbf{u}}_S, \bar{\mathbf{u}}_T, \mathbf{s}) e^{\frac{j\omega s}{\beta c}} \frac{ds}{\beta c} \quad 1.7$$



Часть 2

CST PARTICLE STUDIO (CST PS) разработан для полностью последовательного моделирования свободных движущихся заряженных частиц.

CST



Программа широко использовалась для расчетов импедансов в CERN. Результаты этих расчетов были подтверждены экспериментально.

Часть 2

Wake-потенциал, значение которого (включая продольные и поперечные компоненты) можно получить из электромагнитных полей, оценив следующий интеграл :

$$\vec{W}(\mathbf{u}_s, s) = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} dz [\vec{E}(\mathbf{u}_s, \mathbf{z}_s, t) + c \vec{e}_z \times \vec{B}(\mathbf{u}_s, \mathbf{z}_s, t)]_{t=(s+z)/c} \quad 1.8$$

Продольная и поперечная wake - компонента:

$$W_{\parallel}(\mathbf{u}_s, s) = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} dz [E_z(\mathbf{u}_s, \mathbf{z}_s, t)]_{t=(s+z)/c} \quad 1.9$$

$$W_{\perp}(\mathbf{u}_s, s) = -\nabla \int_{-\infty}^s ds' W_{\parallel}(\mathbf{u}_s, s') \quad 1.10$$

$$Z_{\parallel}(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} W_{\parallel}(s) e^{-i\omega s} ds}{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) e^{-i\omega s} ds} \quad 1.11$$

$$Z_{\perp}(\omega) = i \frac{\int_{-\infty}^{\infty} W_{\perp}(s) e^{-i\omega s} ds}{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) e^{-i\omega s} ds} \quad 1.12$$

Часть 3

В рамках данной работы изучению импедансов связи методом численного моделирования подлежат узлы вакуумной камеры арки:

- Камера дипольного магнита;
- Камера квадрупольного магнита;
- Сильфонное соединение узлов регулярного периода арки;
- Пикап станции регулярного периода.

PARAMETER	VALUE
Bunch length	30 mm
Integration distance	50 m
Frequency max	3,5 GHz
Bunch charge	$1 \cdot 10^{-9}$ К

Wakefield Solver параметры
для моделирования

Часть 3

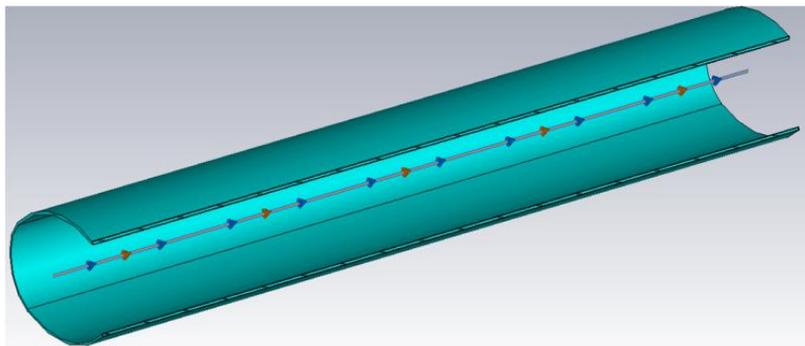


Рис. 1. Камера дипольного магнита

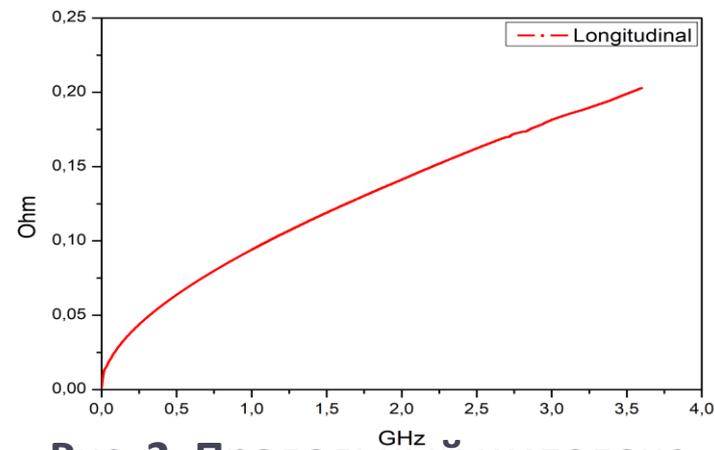


Рис. 2. Продольный импеданс

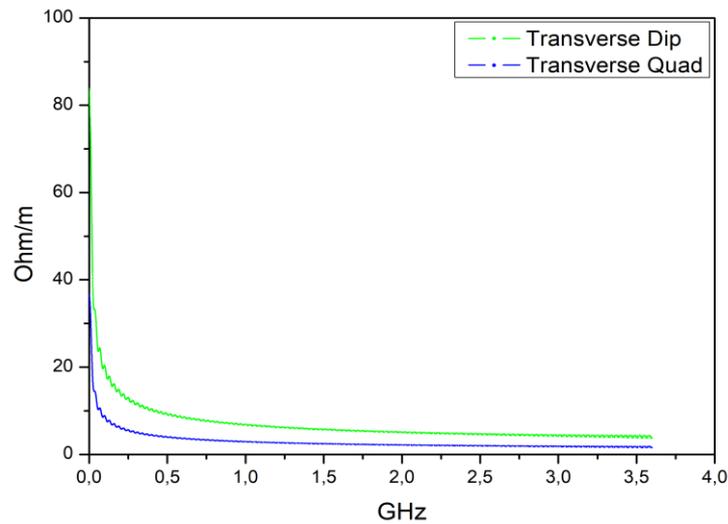
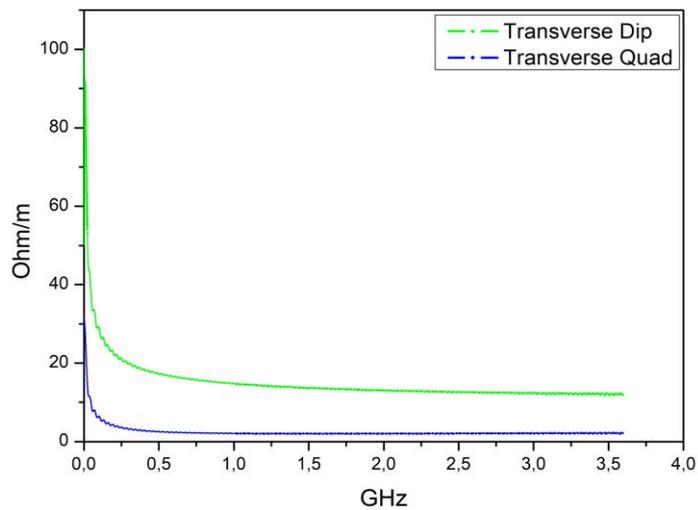


Рис. 3. Поперечный импеданс: слева – в плоскости ZOx, справа – в плоскости ZOy

Часть 3

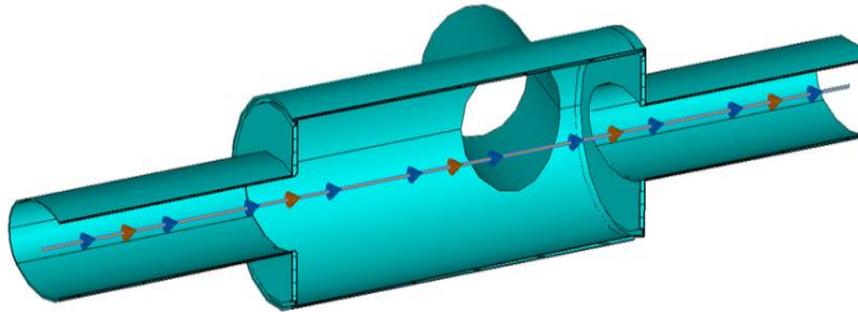


Рис. 1. Камера квадрупольного магнита

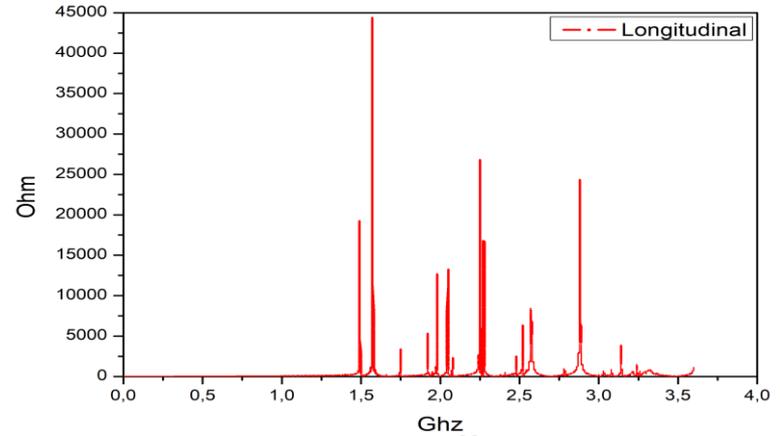


Рис. 2. Продольный импеданс

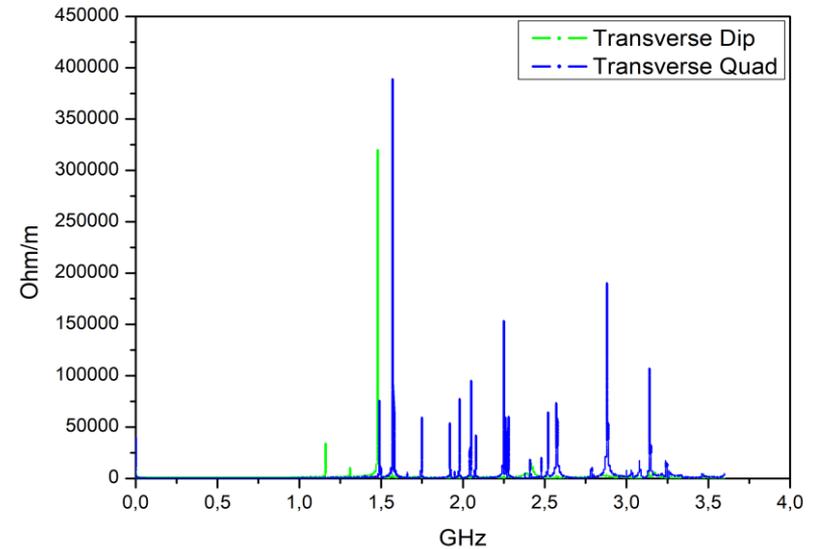
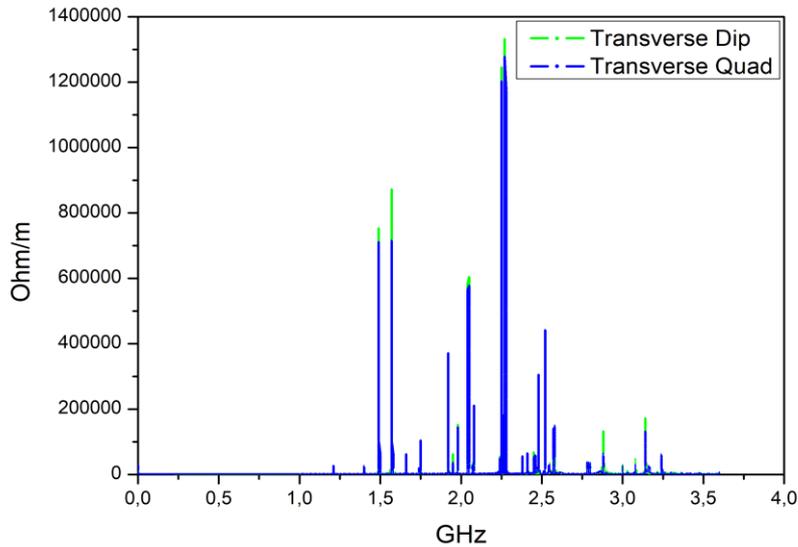


Рис. 3. Поперечный импеданс: слева – в плоскости ZOx, справа – в плоскости ZOy

Часть 3

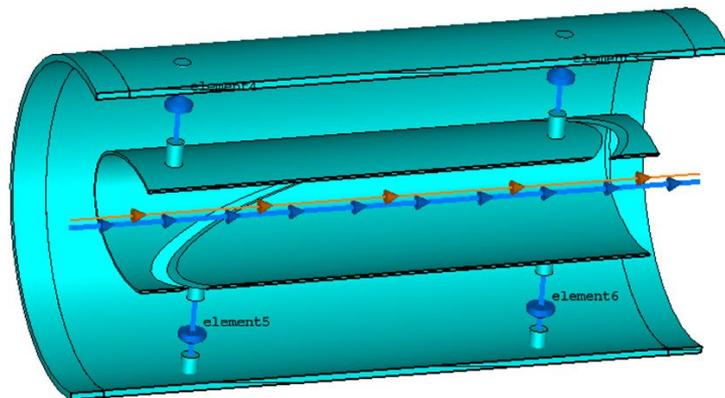


Рис. 1. Пикап станция

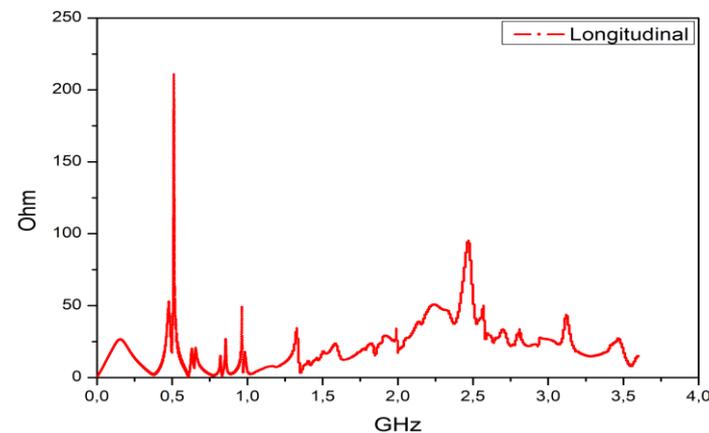


Рис. 2. Продольный импеданс

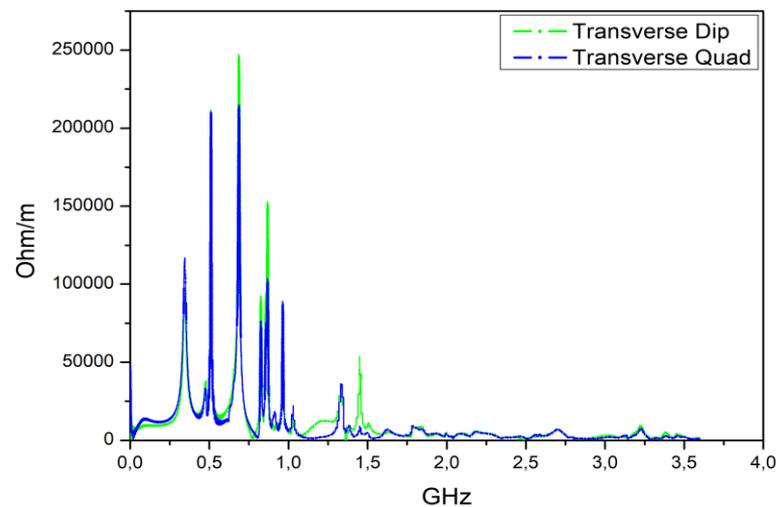
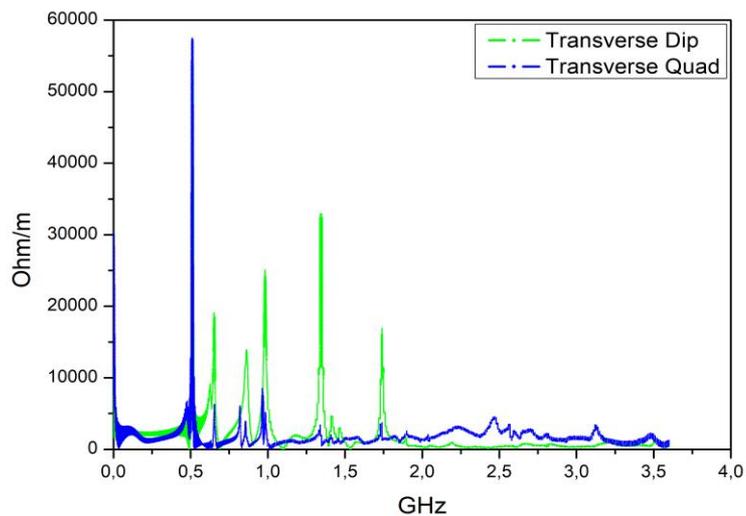


Рис. 3. Поперечный импеданс: слева – в плоскости ZOx, справа – в плоскости ZOy

Часть 3

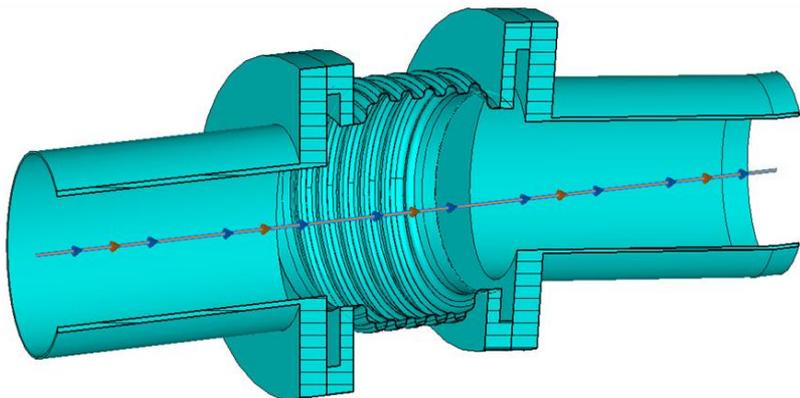


Рис. 1. Сильфонное соединение

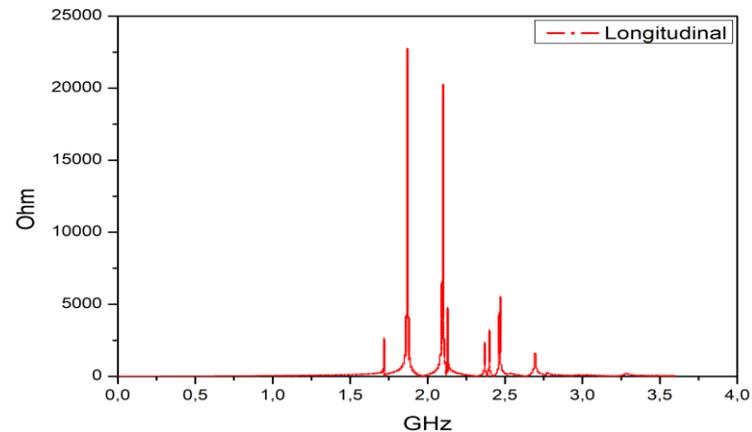


Рис. 2. Продольный импеданс

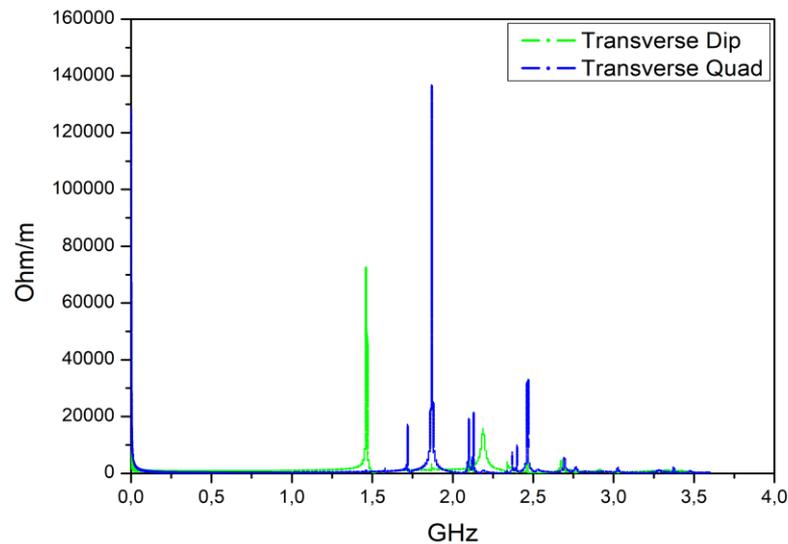
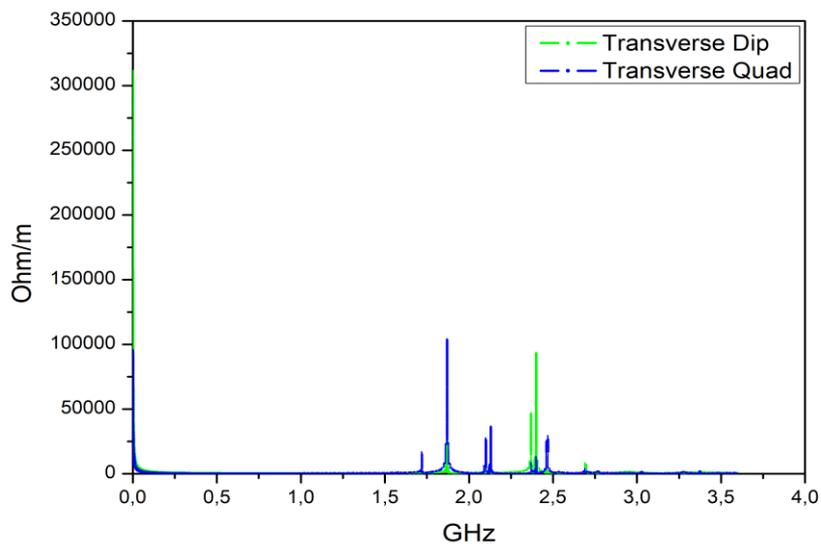


Рис. 3. Поперечный импеданс: слева – в плоскости ZOx, справа – в плоскости ZOy

Выводы и перспектива

✱ Для сгруппированных пучков импеданс рассчитывается на бесконечном числе дискретных частот, заданных спектром моды. Эффективный импеданс, входящий в уравнение сдвига бетатронной частоты, можно затем определить как сумму импедансов связи всех элементов структуры нормированную на спектральную плотность

✱ Обладая знаниями о динамике и стабильности пучка можно будет ставить задачи по оптимизации конструкторских решений с целью минимизации импедансов и достижения максимальной светимости коллайдера.

Спасибо за
внимание!