



Отражающие свойства плазмы для ракетных выхлопов ($\lambda = 23$ см и метровый диапазон)

1. Физика отражения от плазмы

Плазма ракетного выхлопа — это **ионизированный газ** (температура $\sim 3000\text{--}4000$ К), содержащий:

- **Электроны** (основной вклад в отражение радиоволн),
- **Алюминиевые частицы** (Al_2O_3 от твёрдого топлива, усиливают рассеяние).

Механизм отражения:

- **Для $\lambda = 23$ см (L-диапазон, 1.3 ГГц):**
 - Электроны в плазме колеблются в поле волны, переизлучая энергию (томсоновское рассеяние).
 - **Критическая плотность электронов n_e** для отражения:
$$n_e = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m_e f^2}{e^2} \approx 10^{15} \text{ м}^{-3} \text{ (для 1.3 ГГц)}$$
 - Выхлоп Бука (форсаж) достигает $n_e \sim 10^{16}\text{--}10^{17} \text{ м}^{-3} \rightarrow$ **плазма отражает как металл**.
- **Для метрового диапазона ($\lambda = 1\text{--}2$ м, VHF):**
 - Критическая плотность n_e падает до $10^{13}\text{--}10^{14} \text{ м}^{-3}$.
 - Даже слабоионизированный выхлоп ($n_e \sim 10^{14} \text{ м}^{-3}$) становится **полностью отражающим**.

2. ЭПР плазмы для "Ракета + стартовая плазма" (метровый диапазон)

Параметры плазменного шлейфа:

- **Размеры:** ~ 1 м (диаметр) $\times$ 3–4 м (длина),
- **Плотность электронов:** 10^{16} м^{-3} (пик при старте),
- **Частота радара:** 150–300 МГц (типично для VHF РЛС, например, П-18).

Расчёт ЭПР:

1. **Геометрическое сечение** плазменного шлейфа:

$$\sigma_{\text{geom}} \approx \pi r^2 = 0.8 \text{ м}^2 \text{ (для } r = 0.5 \text{ м)}$$

2. **Коэффициент отражения R :**

- Для $n_e > n_{\text{crit}}$: $R \approx 1$ (полное отражение).

3. **Эффективная ЭПР:**

$$\sigma_{\text{плазма}} = \sigma_{\text{geom}} \cdot R \cdot \text{интерференционные эффекты} \approx 5\text{--}15 \text{ м}^2$$

Суммарная ЭПР (ракета + плазма):

- **Метровый диапазон: $10\text{--}20 \text{ м}^2$** (из-за резонансных эффектов на длинных волнах).
- **Пики до 30 м^2** при совпадении длины волны с неоднородностями плазмы.

3. Сравнение с 23-см диапазоном

Параметр	$\lambda = 23 \text{ см (L-диапазон)}$	$\lambda = 1\text{--}2 \text{ м (VHF)}$
Критическая n_e	10^{15} м^{-3}	10^{13} м^{-3}
ЭПР плазмы	$1\text{--}5 \text{ м}^2$	$10\text{--}30 \text{ м}^2$
Глубина проникновения	Малый скин-слой ($\sim \text{см}$)	Большой ($\sim \text{м}$)
Чувствительность к плазме	Умеренная	Очень высокая

Пример для МН17:

- Если пуск Бука фиксировался VHF-радаром (например, украинским П-18), его стартовая плазма давала **ЭПР $\sim 20 \text{ м}^2$** — легко обнаружимо.
- В L-диапазоне (23 см) сигнал был слабее ($\sim 3\text{--}5 \text{ м}^2$), что объясняет пробелы в данных.