

# Osnove mikrovalovne tehnike

## Fizikalni Praktikum V

Matevž Demšar

2. 12. 2026

## 1 Uvod

Pri vaji smo delali z mikrovalovi, torej z elektromagnetnim sevanjem z valovno dolžino reda velikosti  $\sim 1 \text{ cm}$ . Vaja je bila razdeljena na pet delov:

1. Prilagoditev valovoda na generator mikrovalov (imenovan tudi klistron);
2. Meritev frekvence valovanja s pomočjo v valovod vgrajenega resonatorja;
3. Iskanje rodov klistronovega delovanja v odvisnosti od odbojne napetosti;
4. Merjenje moči, ki jih porablja termistor (bolometer) v najmočnejših rodovih klistrona;
5. Snemanje krivulj ubranosti za valovod, zaključen z bremenom ali kratkostično steno.

## 2 Meritve

### 2.1 Prilagoditev valovoda

Prilagajanje smo opravili tako, da smo s spremjanjem odbojne napetosti klistrona poiskali enega od rodov (ki ga prepoznamo tako, da amplituda signala na sondi doseže lokalni maksimum), nato pa smo pri dani napetosti premikali voziček ter vrteli vijak na ubiralki, dokler nismo našli postavitve, v kateri je sonda izmerila najmočnejši signal. Voziček smo do konca vaje pustili v istem položaju, saj je bil valovod s tem prilagojen na klistron.

### 2.2 Frekvenca valovanja

Frekvenco valovanja merimo z resonatorjem, vgrajenim v valovod. To storimo tako, da spremojamo velikost resonatorja (v našem primeru s premikanjem dna), dokler resonator ne postane "uglašen" na merjeno frekvenco (torej, dokler merjena frekvencia ne postane ena od lastnih frekvenc resonatorja). Ko se to zgodi, opazimo na sondi padec v amplitudi signala. Tedaj odčitamo lego vijaka in določimo pripadajočo frekvenco s pomočjo umeritvene tabele 1, podane v navodilih.

lega vijaka	frekvenca [GHz]
100	10,0
300	9,0
500	8,0

Tabela 1: Umeritvena tabela mikrometerskega vijaka resonatorja

Podatki v tabeli 1 namigujejo na linearno odvisnost, in sicer:

$$\nu = \left( 10,5 - \frac{x}{200} \right) \text{ GHz}$$

Predvidevamo, da ima  $x$  enote  $10^{-5} \text{ m}$ , vendar ga lahko obravnavamo tudi kot brezdimenzijsko količino. Minimum amplitude opazimo pri legi  $x = 412 \pm 1$ , kar nam da frekvenco  $\nu = (8.44 \pm 0.01) \text{ GHz}$ .

### 2.3 Iskanje rodov

Spreminjamo odbojne napetosti klistrona in opazujemo, kje se pojavijo maksimumi jakosti valovanja.

Indeks	$U$ [V]
1	$-44 \pm 1$
2	$-77 \pm 1$
3	$-141 \pm 1$
4	$-224 \pm 1$
5	$-356 \pm 1$

Tabela 2: Izmerjeni rodovi klistrona.

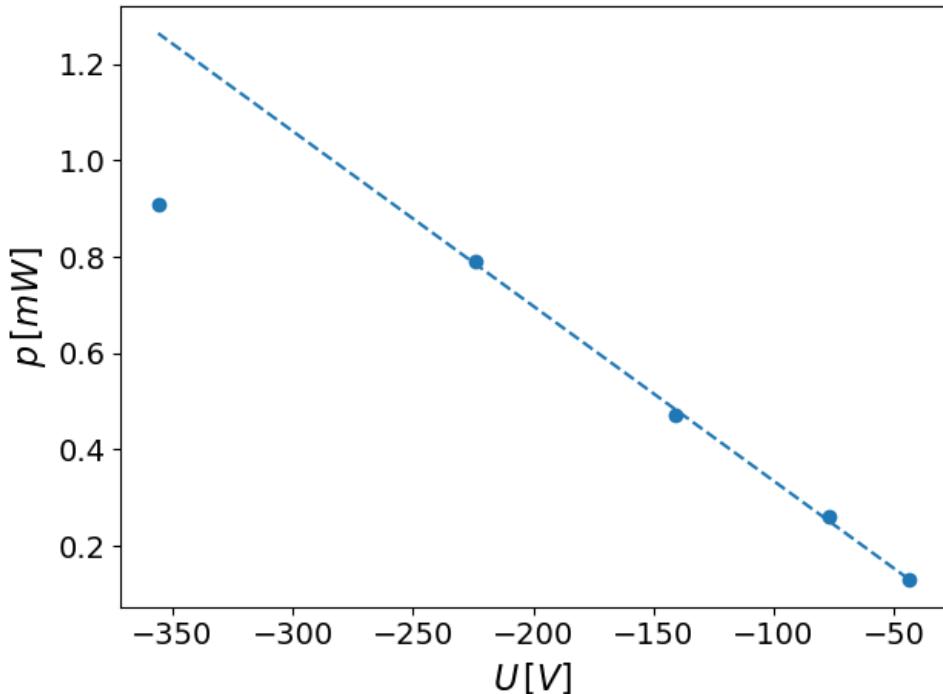
### 2.4 Moč valovanja

Namesto antene na valovod pritrdimo bolometer (termistor) in izmerimo moč v rodovih. Podatke iz

Indeks	$U$ [V]	$P$ [mW]
1	$-44 \pm 1$	0,13
2	$-77 \pm 1$	0,26
3	$-141 \pm 1$	0,47
4	$-224 \pm 1$	0,79
5	$-356 \pm 1$	0,91

Tabela 3: Moč izmerjenih rodov klistrona. Podatke se splača predstaviti tudi z grafom (slika 1).

tabele 3 narišemo na graf. Opazimo linearen trend pri manjših vrednostih  $U$ , vendar imamo premalo merskih točk, da bi lahko o odvisnosti  $P(U)$  delali drznejše skele.



Slika 1: Graf  $P(U)$  za izmerjene rodove. Pri nizkih  $U$  imamo očitno linearno odvisnost, vendar težko presodimo, ali se nadaljuje tudi pri višjih napetostih - na osnovi meritve pri  $U = -356$  V lahko sklepamo, da ne.

## 2.5 Krivulje ubranosti

Krivulje ubranosti izmerimo tako, da sondo na vozičku potiskamo vzdolž poti valovanja in hkrati merimo lego vozička ter napetost na sondi (ki predstavlja amplitudo valovanja). Z grafa  $U(x)$  (slika 2) bomo nato razbrali slede v ce podatke:

- Minimalni in maksimalni odčitek, ko je na valovod pritrjeno breme - bolometer (označimo  $h_{min}$  in  $h_{max}$ )
- Valovno dolžino valovanja  $\lambda'$  (ki smo jo sicer implicitno že izmerili, ko smo določili frekvenco valovanja)
- Fazni zamik med valovanjem, ko se valovod konča z bremenom (bolometrom), in valovanjam, ko se valovod konča s kratkostično steno -označimo  $x'_{min}$ .

Ker smo imeli pri merjenju  $U$  in  $x$  ogromno šuma, najprej zmanjšamo število merskih točk, tako, da izračunamo povprečja po štirih zaporednih točk. Se pravi, če označimo z  $X = \{x_i; i = 1, 2, \dots, N\}$  in  $U = \{U_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ , množici meritev, na graf narišemo množici

$$\mathcal{X} = \left\{ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{4i+j} \right\} \quad \text{in} \quad \mathcal{U} = \left\{ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 U_{4i+j} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N/4$$

Izbira, da povprečimo vsakih 4 točk, je v bistvu arbitarna, načeloma pa večje število točk vodi do manjše napake pri fitu. Iskanje  $h_{min}$ ,  $h_{max}$ ,  $\lambda'$  in  $x'_{min}$  namreč izvedemo tako, da na grafe s pomočjo pythonove funkcije `scipy.optimize.curve_fit` prilagodimo funkcijo

$$f(x) = A \cdot \sin(Bx + C) + D$$

Tedaj velja:

$$\begin{aligned} h_{min} &= -A_b + D_b & \lambda' &= \frac{2\pi}{B_b} \\ h_{max} &= A_b + D_b \end{aligned}$$

Z indeksom  $b$  smo označili parameter za bolometer (ali breme). Vrednost  $x'_{min}$  pa najlažje kar odčitamo, saj zaradi periodičnosti sinusne funkcije ne moremo preveč računati na natančnost parametra  $C$ , ki ga potrebujemo za izračun Dobimo več vrednosti  $x'_{min}$ , zato vzamemo njihovo povprečje.

$$\begin{aligned} h_{min} &= (-0, 21 \pm 0, 18) \text{ V} & \lambda' &= (2, 5 \pm 1, 3) \text{ cm} \\ h_{max} &= (-0, 04 \pm 0, 18) \text{ V} & \overline{x'_{min}} &= (0, 75 \pm 0, 08) \text{ cm} \end{aligned}$$

V navodilih imamo sledeče formule:

$$s = \sqrt{\frac{|h_{max}|}{|h_{min}|}} \tag{1}$$

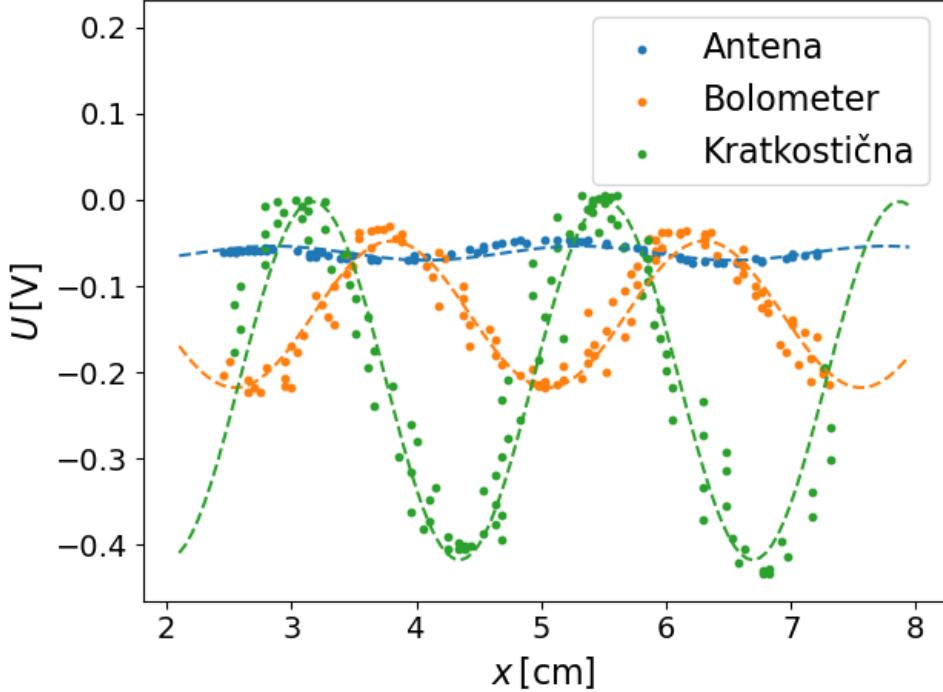
$$\frac{x'_{min}}{\lambda'} = \frac{\beta x_{min}}{2\pi} \tag{2}$$

$$\frac{\eta_R}{Z_0} = \frac{(s^2 - 1) \tan(\beta x_{min})}{1 + s^2 \tan^2(\beta x_{min})} \tag{3}$$

$$\frac{\xi_R}{Z_0} = \left( 1 - \frac{\eta_R}{Z_0} \tan(\beta x_{min}) \right) s \tag{4}$$

Vemo tudi, da  $\lambda'$  ustreza polovici valovne dolžine v valovodu, se pravi  $\lambda = 2\lambda'$ . Iz relacije  $c = \lambda\nu$  dobimo:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot (2, 5 \pm 1, 3) \cdot 10^{-2} \text{ m}} = (5, 9 \pm 3, 2) \text{ GHz}$$



Slika 2: Z grafa  $U(x)$  bomo s pomočjo sinusnega fita poskusili razbrati količine, s katerimi bomo lahko izračunali impedanco bremena, valovno dolžino valovanja in tako naprej.

To se sicer (v okviru napake) ujema s prej izmerjeno vrednostjo, je pa zakrbljujoče, da imamo tako veliko odstopanje.

Z enačbo 1 izračunamo ubranost  $s$  za bolometer (za kratko stično steno bi morali po teoriji dobiti  $s = 0$ , v praksi po isti formuli dobimo  $s = 0,06 \approx 0$ ):

$$s = \sqrt{\frac{|h_{max}|}{|h_{min}|}} = 0,46 \pm 1,13$$

Z enačbo 2 izračunamo  $\beta x_{min}$ :

$$\beta x_{min} = 2\pi \frac{x'_{min}}{\lambda'} = 1,9 \pm 1,2$$

Kar nam omogoča po enačbah 3 in 4 izračunati reaktanco in resistanco bolometra:

$$\frac{\eta_R}{Z_0} = 0,8 \pm 16,8$$

$$\frac{\xi_R}{Z_0} = 1,6 \pm 51,9$$

Ker je  $Z_R = \xi_R + i\eta_R$ , lahko izračunamo  $Z_R/Z_0$  kot

$$\left| \frac{Z_R}{Z_0} \right| = \sqrt{\left( \frac{\eta_R}{Z_0} \right)^2 + \left( \frac{\xi_R}{Z_0} \right)^2} = 1,8 \pm 96,6$$

### 3 Zaključek

Zaradi velike napake dobljeni rezultati niso zelo uporabni. Del vzroka za napako predstavlja obnašanje funkcije  $\tan \beta x_{min}$  v okolini  $\beta x_{min}$  - ker je vrednost funkcije majhna, je vsakršna napaka zelo velika. Drugi del napake je napaka pri fitu s funkcijo `scipy.optimize.curve_fit`. S čim si tako lep fit zasluži tako veliko napako, pa ni povsem jasno. Parameter, ki opisuje fazo, ima lahko veliko napako zaradi periodičnosti sinusne funkcije, vendar to na naše izračune ne vpliva, saj na podlagi tega parametra nismo izračunali nobene količine.