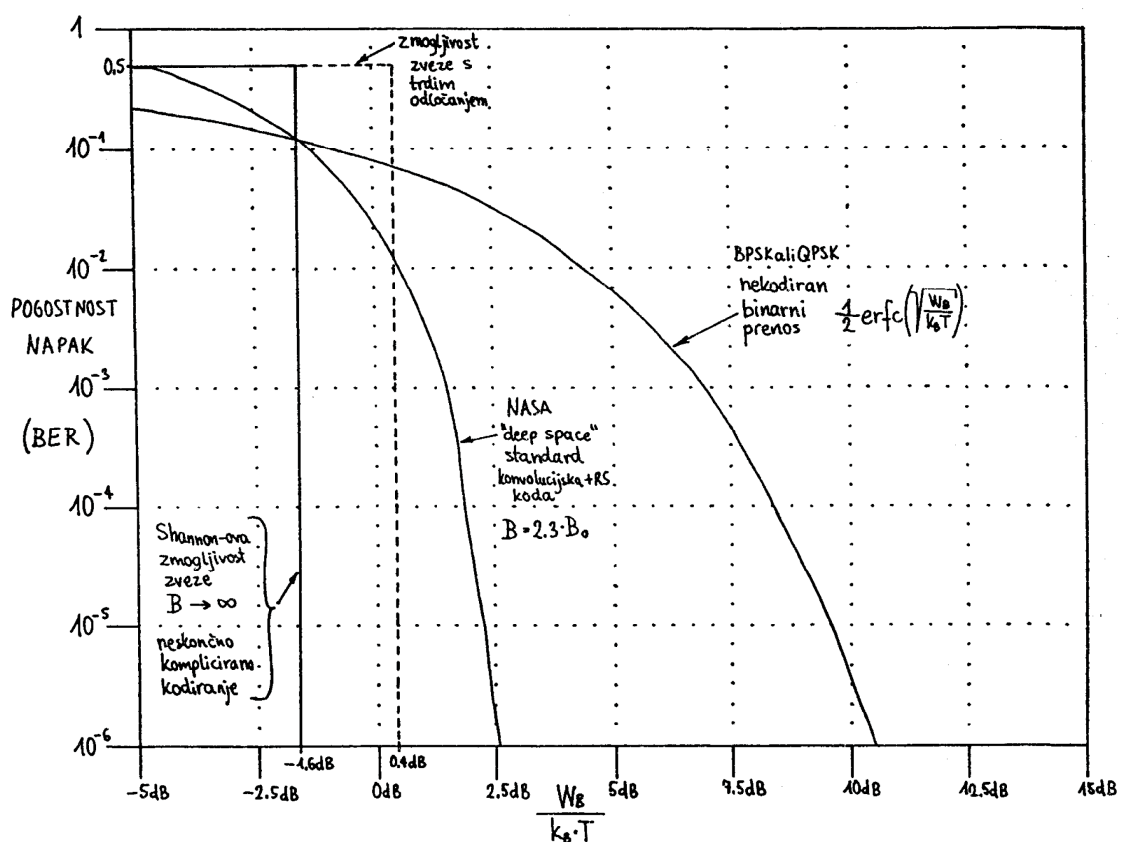


VAJA 29: Merjenje pogostosti napak v radijski zvezi

1. Odpornost radijske zveze na šum in motnje

Odpornost radijske zveze na šum in motnje zavisi od vrste uporabljenega kodiranja in modulacije, kot tudi od tehnične izvedbe uporabljenih oddajnikov in sprejemnikov. V slučaju analognega prenosa je merilo kvalitete zveze razpoložljivo razmerje signal/šum in popačenje želenega izhodnega signala. Oboje lahko izboljšamo s primerno predelavo signala v oddajniku in sprejemniku, na račun povečane pasovne širine B visokofrekvenčnega signala.

V slučaju številskega (digitalnega) prenosa nas zanima predvsem pogostost pojavljanja napak BER (*angl. Bit Error Rate*). Teorija (Shannon) nam pri tem daje spodnjo mejo moči oddajnika za željeno zmogljivost, kot je to prikazano na Sliki 1. Shannon-ove meje praktično ne moremo doseči, saj zahteva neskončno komplicirano kodiranje in obdelavo signalov.

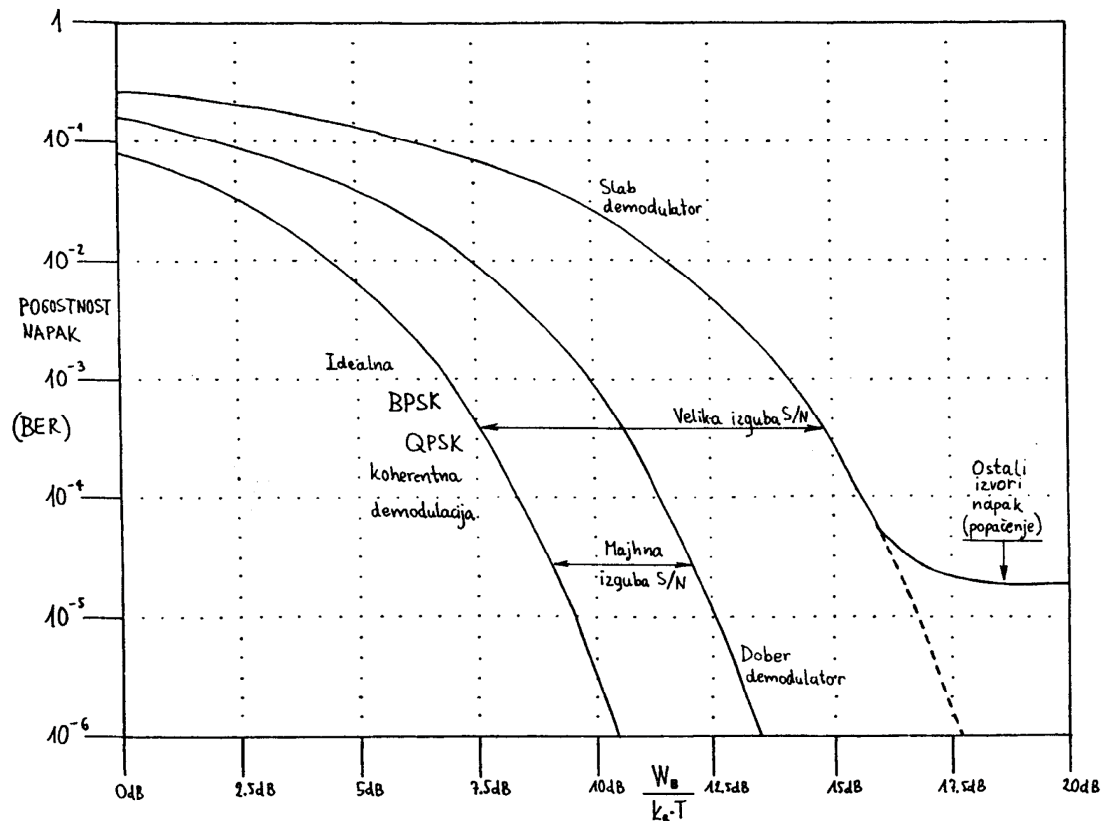


Slika 1: Pogostost napak pri nekodiranem in kodiranem prenosu

S primernim kodiranjem, na primer *NASA deep-space standard*, ki vsebuje konvolucijsko in blokovo (Reed-Solomon) kodiranje, lahko glede na zahtevano mejo za pogostost pojavljanja napak dosežemo prihranek moči oddajnika tudi za faktor do 8 dB v primerjavi z nekodiranim PSK (BPSK ali QPSK) prenosom. Bolj pogost pojav je poslabšanje kvalitete zveze zaradi popačenj v oddajniku in sprejemniku. Že samo omejevanje signala v sprejemniku oziroma trdo odločanje v demodulatorju prinese izgubo 2 dB glede na idealni slučaj.

Resnični PSK sprejemnik zato ne more doseči niti krivulje pogostosti napak za idealni PSK demodulator, kot je to prikazano na Sliki 2. Krivulja resničnega sprejemnika se približa idealni krivulji na nekaj decibelov. Merilo za kvaliteto demodulatorja je torej odstopanje izmerjene

krivulje BER od idealne krivulje. V nekaterih slučajih (popačenja, motnje) kljub naraščajoči jakosti vhodnega signala pogostost pojavljanja napak nikoli ne upade pod določeno mejo.



Slika 2: Pogostost napak resničnih PSK sprejemnikov

Izmerjena krivulja pogostosti napak kot funkcija vhodnega razmerja signal/šum pri nekodiranem prenosu zato predstavlja merilo za kvaliteto demodulatorja. Pogostost napak za idealni BPSK demodulator je prikazana na Sliki 3. Pri praktičnih meritvah moramo biti predvsem pozorni na to, da razen BER pravilno izmerimo tudi vhodno razmerje signal/šum. Predvsem pri šumu moramo paziti na to, da računamo s pravilno, efektivno pasovno širino B .

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{W_b}{k_b T}} \right)$$

$W_b \equiv$ energija enega bita

$$k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$T \equiv$ šumna temperatura sistema

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2} du = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

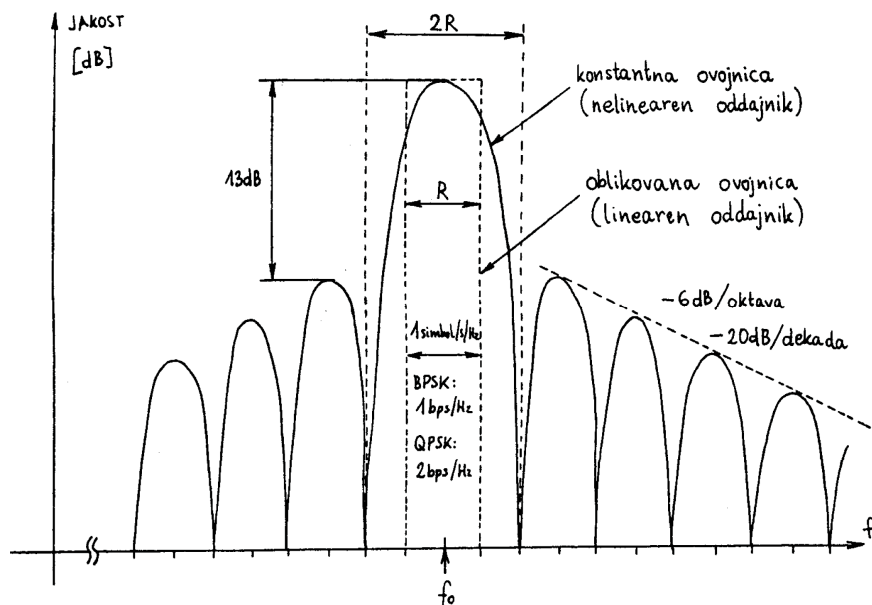
$$P_s = W_b \cdot R ; R \equiv \text{simbolna (bitna) hitrost (BPSK)}$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{P_s}{R k_b T}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{P_s}{P_n}} \right) ; P_n \text{ pri } B=R !$$

Slika 3: Pogostost napak pri BPSK modulaciji

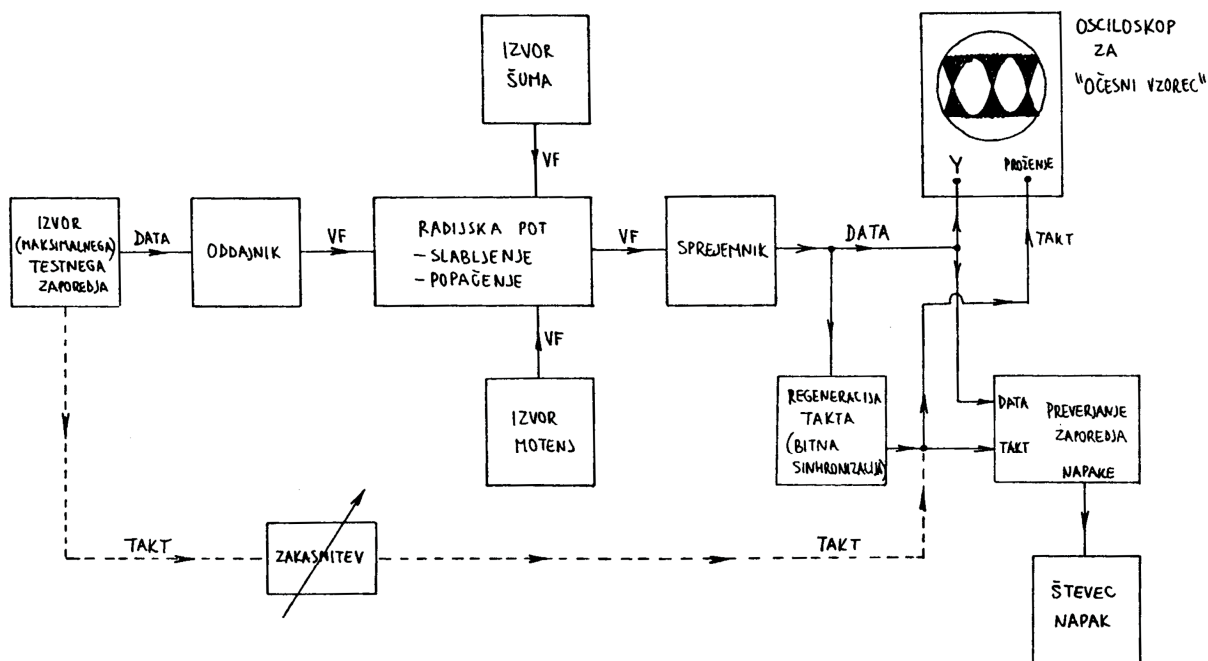
Povezava med efektivno pasovno širino B in obliko frekvenčnega spektra signala je prikazana na Sliki 4. Ne glede na obliko ovojnice (konstantna ovojnica ali oblikovana ovojnica) ostaja

efektivna pasovna širina B konstantna, saj je odvisna le od bitne hitrosti R . V slučaju dvofazne PSK (BPSK) modulacije je B kar enak R .



Slika 4: Frekvenčni spekter PSK (BPSK, QPSK) oddaje

Meritev pogostosti napak (BER) v digitalni radijski zvezi je prikazana na Sliki 5. Zvezo preizkusimo tako, da skoznjo pošljemo primerno dolgo sporočilo s skrbno izbrano vsebino. Matematična rešitev naloge iskanja primerne preizkusnega sporočila je zaporedje maksimalne dolžine, ki ga proizvaja pomikalni register z linearno povratno vezavo. V slučaju binarnega pomikalnega registra dajo linearno povratno vezavo EXOR logična vrata, dolžina maksimalnega zaporedja pa znaša $2^N - 1$, kjer je N število stopenj pomikalnega registra.



Slika 5: Meritev pogostosti napak (BER) v digitalni radijski zvezi

Ker delovanje pomikalnega registra z linearno povratno vezavo ustreza algoritmu verižnega deljenja polinomov z binarnimi koeficienti, napravo imenujemo polinomiški generator ter jo

popolnoma opišemo s pripadajočim polinomom. Maksimalno zaporedje dajo le nerazcepni polinomi in še to ne vsi, zato je treba povratno vezavo pomikalnega registra skrbno izbrati. Matematična odlika maksimalnega zaporedja je v tem, da vsebuje prav vse možne bitne vzorce dolžine enake dolžini registra (razen stanja samih ničel), kar hkrati daje frekvenčni spekter s samimi enako visokimi spektralnimi črtami.

S poskusnim zaporedjem krmilimo oddajnik, radijska zveza pa vnaša slabljenje in različna popačenja. Razen želenega signala dobi sprejemnik na vhod tudi šum in motnje. Grobe napake v zvezi opazimo že iz "očesnega vzorca" (*angl. eye pattern*) na osciloskopu. Osciloskop prožimo z regeneriranim taktom, kar v slučaju radijske zveze opravlja že sam sprejemnik.

Na drugem koncu merjene zveze preverjamo sprejeto zaporedje z vnaprej znanim vzorcem. V ta namen potrebujemo povsem enak generator zaporedja s pomikalnim registrom, ki ga moramo sinhronizirati z enakim registrom v oddajniku. Najenostavnejša rešitev je uporaba polinomskega delilca, ki se sam sinhronizira na vstopne podatke. Na izhodu polinomskega delilca sicer dobimo za vsako napako tri ali več impulzov, glede na število členov polinoma (odcepov pomikalnega registra).

Pri simetrični BPSK (QPSK) modulaciji brez preostalega nosilca moramo upoštevati tudi nedoločenost faze v sprejemniku. Pri simetrični BPSK modulaciji se lahko vezje regeneracije nosilca zaklene na pravilno fazo oziroma na 180° zamaknjeno fazo. Pri simetrični QPSK so možni fazni odmiki 0° , 90° , 180° in 270° .

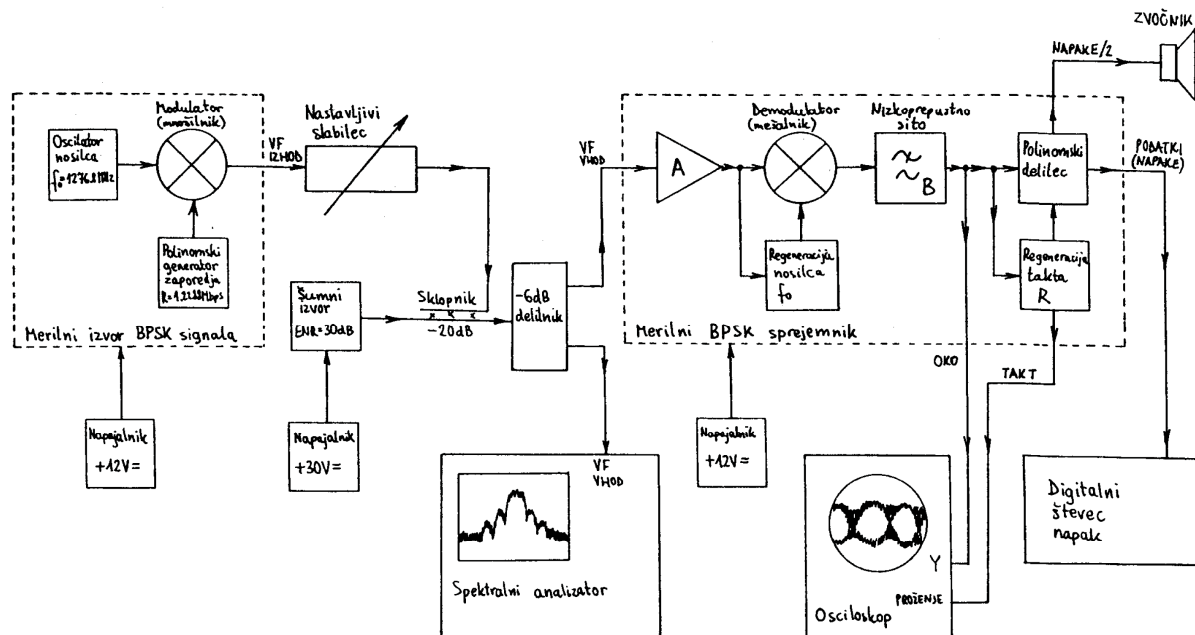
Kodiranje signala mora zato upoštevati nedoločenost faze v sprejemniku. Običajno uporabljamo diferencialno kodiranje, da so sprejeti biti enoveljavno določeni. Pri meritvi pogostosti napak moramo seveda upoštevati vse možne faze sprejemnika kot tudi nove vrste napak, ki se pojavijo takrat, ko regeneracija nosilca preskoči na drugačno fazo (*carrier-cycle slip*).

2. Seznam potrebnih pripomočkov

Za izvedbo vaje potrebujemo:

- Merilni izvor BPSK signala (1276,8 MHz, 1,2288 Mbit/s) z vgrajenim polinomskim generatorjem in napajalnikom.
- Nastavljivi, kalibrirani 50-ohmski VF slabilec.
- Izvor šuma s plazovno diodo in ustreznim napajalnikom.
- -20dB smerni sklopnik za 1,3GHz.
- -6dB uporovni delilnik.
- Spektralni analizator s pripomočki (nizkoprepustno sito, nizkošumni predojačevalnik, napajalniki).
- Merilni BPSK sprejemnik z vgrajeno regeneracijo takta, polinomskim delilcem in napajalnikom.
- Osciloskop z možnostjo zunanjega proženja.
- Digitalni števec (frekvencmeter) za 50 MHz.
- Zvočnik (z vgrajenim nizkofrekvenčnim ojačevalnikom).
- Kable in konektorje za vse povezave.

Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov je prikazana na Sliki 6.



Slika 6: Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov

3. Obrazložitev in opis poteka vaje

Meritev pogostosti napak v digitalni radijski zvezi je v bistvu meritev občutljivosti sprejemnika. Ker je domet radijske zveze, to je razmerje med močjo oddajnika in občutljivostjo sprejemnika, zelo visoka številka, tudi do 150 dB in več, moramo pri meritvah v laboratoriju poskrbeti za primerno oklapljanje oddajnika in sprejemnika.

V ta namen uporabimo merilni BPSK oddajnik majhne moči (+10 dBm), ki mu izhod še dodatno oslabimo z nastavljivim slabilec in -20 dB sklopnikom. Občutljivost sprejemnika umetno poslabšamo s šumnim izvorom s plazovno diodo, saj pri tej vaji ne merimo občutljivosti sprejemnika pač pa kakovost demodulatorja. Šumni izvor hkrati prekrije lastni šum spektralnega analizatorja in lastni šum merjenega demodulatorja, da obe napravi krmilimo z istim razmerjem signal/šum.

Merilni BPSK izvor vsebuje dva različna polinomska generatorja zaporedij: $1 + X^4 + X^9$ s periodo 511 taktov in $1 + X^{12} + X^{17}$ s periodo 131071 taktov, kar izbiramo s stikalom na prednji plošči izvora. Na sprejemni strani zaporedje preverjamo s polinomskim delilcem. Tudi tu izberemo željeni polinom s stikalom na prednji plošči sprejemnika. Ker imata polinoma po tri člene, dobimo za vsako napako po tri impulze na izhodu. V sprejemnik je vgrajen še delilnik impulzov z 2, da odstranimo enosmerno komponento v slučaju uporabe števca z izmeničnim vhodom.

Vhodno razmerje signal/šum odčitamo na spektralnem analizatorju. Pri tem nastavimo širino medfrekvenčnega sita spektralnega analizatorja vsaj 10-krat ožjo od glavnega lista spektra BPSK modulacije. Na ta način opazujemo tudi BPSK signal kot šum in velja za signal in za šum isti faktor povprečenja, ki se v merjenem razmerju signal/šum točno krajša, ko vključimo video sito na spektralnem analizatorju.

Pri točni meritvi razmerja signal/šum moramo paziti na motnjo iz vezja regeneracije nosilca sprejemnika, ki lahko popači sliko na zaslonu spektralnega analizatorja. Med meritvijo razmerja signal/šum zato izključimo NAPAČNJE sprejemnika in nikakor ne VF vhod, ker bi s tem pokvarili prilagoditve impedanc. Za vse meritve sicer zadošča ena sama meritev

razmerja signal/šum pri razmeroma visokih vrednostih (okoli 20 dB), saj lahko ostala razmerja preprosto določimo s kalibriranim nastavljenim slabilcem signala.

Če upoštevamo pasovno širino sprejemnika in BPSK signala, potem je iskano razmerje signal/šum kar enako razmerju med temensko vrednostjo glavnega lista spektra modulacije in povprečno vrednostjo šuma. Bolj enostavno, odčitano razmerje teme glavnega lista spektra proti šumu je kar $W_b/(k_bT)$, to je argument, ki ga pretvorimo iz dB v linearne enote, korenimo in vstavimo v $\text{erfc}(x)$.

4. Prikaz značilnih rezultatov

Preden začnemo s pravo meritvijo, preverimo delovanje vseh naprav, predvsem pa ne smemo pozabiti nastaviti točno frekvenco nosilca oddajnika. Sprejemnik ima v ta namen vgrajen inštrument z vrtljivo tuljavico za prikaz odstopanja frekvence nosilca. Vajo nato začnemo z meritvijo razmerja signal/šum s spektralnim analizatorjem, da umerimo skalo nastavljenega slabilca signala.

Pri vaji nato izmerimo pogostost napak pri različnih razmerjih signal/šum, da bi na koncu narisali diagram kot na Sliki 2. Pri pogostosti napak nad 1% ($1,0 \cdot 10^{-2}$) vnaša pogreške prekrivanje posameznih impulzov na izhodu polinomskega delilca. Krivuljo pogostosti napak je smiselno meriti do vrednosti $1,0 \cdot 10^{-7}$, kar pomeni pri hitrosti 1,2288 Mbit/s eno napako vsakih 8 sekund.

Pri vaji izmerimo in narišemo dve krivulji pogostosti napak za oba polinoma: $1 + X^4 + X^9$ in $1 + X^{12} + X^{17}$. Izmerjeni krivulji primerjamo s krivuljo za idealni PSK demodulator ter določimo izgubo S/N uporabljenega PSK demodulatorja. Krivulji tudi primerjamo med sabo ter tako poskusimo določiti druge izvore napak v zvezi.