

MODEL RAZINE SPEKTRA GUSTOĆE SNAGE HIDROAKUSTIČKOGA ŠUMA MORA¹

Power Spectral Density Level Model of Underwater Acoustic Noise

UDK 534.21=574.5

Original scientific paper

Izvorni znanstveni članak

Sažetak

Hidroakustički okolni šum dubokoga mora može se smatrati vlastitim šumom samoga mora. On je stohastički proces. Njegovi parametri su statističke srednje vrijednosti dobivene dugim vremenom promatranja. Za hidroakustički okolni šum dubokoga mora pretpostavlja se da je stacionaran ergodički stohastički proces Gaussove distribucije. Pretpostavka stacionarnosti i Gaussove distribucije je prihvatljiva samo za kratka vremenska razdoblja. Spektar gustoće snage hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora je determinirana funkcija frekvencije. U radu se obuhvaća područje od 20 Hz do 20 kHz. Unutar toga područja su najvjerojatniji izvori šuma udaljeno brodovlje i valovitost morske površine (stanje mora). U radu se izvodi matematički model za razinu srednje vrijednosti spektra gustoće snage hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora za navedeno frekvencijsko područje. Na temelju matematičkog modela određuje se varijanca i funkcija korelacije, te se verificira istinitost ergodičke hipoteze.

Ključne riječi: hidroakustički okolni šum mora, spektar gustoće snage, ergodička hipoteza.

Summary

The deep-sea noise as the ambient sea noise may be said to be the noise of the sea itself. It is a stochastic process. Its parameters are statistical means obtained during a long time of observation. The deep-sea ambient noise is supposed to be a stationary ergodic stochastic process with the Gaussian distribution. The stationarity and Gaussian approximation of the noise is good enough over short time periods. Its power spectral density is a deterministic function versus frequency. The article deals

with frequency band from 20 Hz to 20 kHz. The most probable sources of noise in this frequency interval are distant ship traffic and roughness of the sea surface or the sea-state. A mathematical model of the average power spectral density level of the deep-sea ambient noise in the frequency interval from 20 Hz to 20 kHz is derived. Variance and correlation function are calculated and the ergodic hypothesis of the deep-sea ambient noise is verified on the basis of mathematical model.

Key words: underwater ambient sea noise, power spectral density, ergodic hypothesis.

1. Uvod

Introduction

Za hidroakustički okolni šum dubokoga mora pretpostavlja se da je Gaussov stohastički proces [4,5]. Razmatranje šuma obavljat će se na udaljenostima od najmanje 600 m od obale, na dubinama većim od 100 m, za stanje mora 2 i za srednju jakost utjecaja udaljenoga brodovlja. Dodatna pretpostavka o stacionarnosti okolnoga šuma mora vrijedi samo za kraće vremenske intervale [4].

Spektar gustoće snage hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora daleko od obale može se prikazati unutar nekoliko frekvencijskih područja s raznim nagibima [4]. Svako od frekvencijskih područja pripada određenome glavnom izvoru nastaloga šuma. Spektar gustoće snage najčešće se prikazuje u relativnim razinama izraženim u decibelima, odnosno $L(f)$ dB. Razina spektra gustoće snage je jakost u decibelima prema jakosti ravnoga zvučnog vala efektivni tlak kojega iznosi $1 \mu\text{Pa}$ sveden na frekvencijski interval od 1 Hz.

¹ Rad predstavlja dio obrade iz znanstvenoistraživačkoga projekta 0177180 (Istraživanje prijemnih optimalnih struktura pasivnog sonara) koji novčano podupire Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske.

*Prof. dr. sc. Kosta Ugrinović, dipl. inž., Fakultet prirodoslovno-matematičkih znanosti i odgojnih područja Sveučilišta u Splitu, Split

U ovome će se radu razmatrati samo tri frekvencijska područja koja su posebno važna za pasivnu hidrolokaciju [4], i to: 20-150 Hz, 150-500 Hz i 500-20000 Hz.

Prvo frekvencijsko područje (20-150 Hz) ima srednji spektralni nagib od oko -1 dB po oktavi. Najvjerojatniji izvor šuma je udaljeno brodovlje. Razina spektra gustoće snage šuma nije ovisna o stanju mora.

Drugo frekvencijsko područje (150-500 Hz) ima srednji spektralni nagib od oko -5 do -6 dB po oktavi. Najvjerojatniji izvori šuma su udaljeno brodovlje i stanje mora. Dominantan izvor šuma je udaljeno brodovlje.

Treće frekvencijsko područje (500-20000 Hz) ima srednji spektralni nagib također od oko -5 do -6 dB po oktavi. Najvjerojatniji izvor šuma je valovitost površine mora ili tzv. stanje mora [1].

daleko od obale, u frekvencijskom području 20-20000 Hz te za vrijednost stanja mora 2. Taj uzorak predstavlja jedan primjer spektra gustoće snage okolnoga šuma dubokoga mora, koji bi se eventualno mogao opaziti bilo gdje u dubokom moru. Sl.1 pokazuje srednje vrijednosti razina spektra gustoće snage jednoga takvog tipičnog uzorka okolnoga šuma dubokoga mora [4].

Kao što je u uvodu naglašeno, razina spektra gustoće snage hidroakustičkoga okolnog šuma dubokoga mora u frekvencijskom području 20-20000 Hz ima tri specifična frekvencijska potpodručja. Svako frekvencijsko potpodručje ima svoj dominantni izvor šuma mora. Sve to isto vrijedi i za tipični uzorak, koji će poslužiti kao baza za određivanje modela u obliku jedinstvene funkcije frekvencije za cijelo frekvencijsko područje od 20-20000 Hz.

2. Razina spektra gustoće snage Power spectral density level

Hidroakustički okolni šum dubokoga mora, dovoljno daleko od obale i unutar kraćih vremenskih intervala, stacionaran je, ergodičan, stohastičan proces Gaussove distribucije. Razina mu spektra gustoće snage ima ovaj oblik

$$L(f) = 10 \cdot \log \frac{I(f)}{I_0} \quad (1)$$

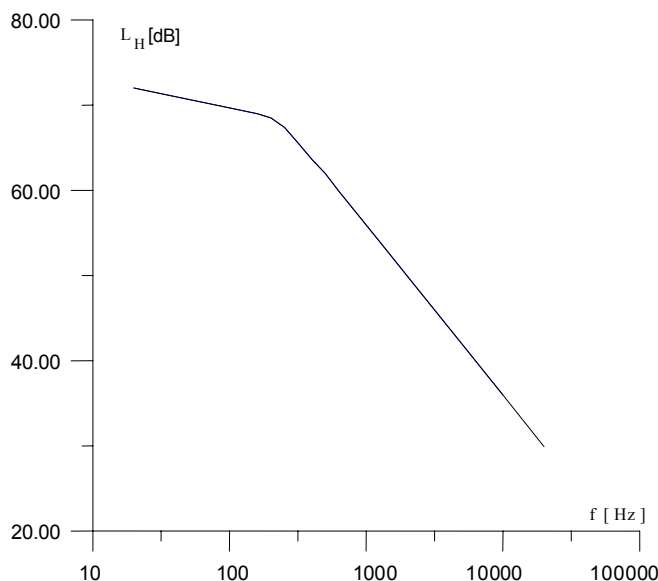
i determinirana je funkcija frekvencije. U relaciji (1) je $I(f)$ jednostrani spektar gustoće snage šuma mora u W/m^2 . Referentna je vrijednost $I_0 = 0.64 \cdot 10^{-18} W/m^2$.

Razmatrat će se tipični uzorak srednjih vrijednosti razina spektra gustoće snage okolnog šuma dubokoga mora u decibelima relativno prema $1 \mu Pa^2/Hz$, dovoljno

3. Model razine spektra gustoće snage Model of power spectral density

Prva je misao da se krivulja spektra gustoće snage šuma mora L_H sa Sl.1 razmatra kao dva ograničena dijela pravaca koji su oko presjecišta međusobno spojeni dijelom krivulje u obliku koljena. Prva dužina sadrži tri oktave i dio je pravca s nagibom od -1 dB/oktava (u frekvencijskom potpodručju od 20-160 Hz) i druga dužina sadrži pet oktava i dio je pravca s nagibom od -6 dB/oktava (u frekvencijskom potpodručju od 625-20000 Hz). Drugi pravac se može opisati s pomoću relacije (1) ako se jednostrani spektar gustoće snage šuma mora prikaže ovim oblikom [2]

$$I(f) = \frac{C}{f^2} \quad (2)$$



Slika 1. Razina spektra gustoće snage tipičnog uzorka hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora L_H relativno prema $1 \mu Pa^2/Hz$, za stanje mora 2 i za srednju jakost utjecaja udaljenoga brodovlja
Figure 1. Power spectral density level of the deep-sea ambient noise (hypothetic sample) L_H relative to $1 \mu Pa^2/Hz$. for scale of waves - 2 (rippled) and the distant ship traffic average power

pa relacija (1) postaje

$$L(f) = 10 \log \frac{C/I_0}{f^2} = 10 \log(C/I_0) - 10 \log(f^2) = A - 10 \log(f^2) \quad (3)$$

gdje je $A=10\log(C/I_0)$. Relacija (3) je opći oblik jednadžbe pravca s nagibom od -6 dB po oktavi.

Da bi se postigla jedinstvena funkcija frekvencije za cijelo frekvencijsko područje od 20-20000 Hz nužno je da relacija (3) obuhvati i pravac s nagibom od -1 dB po oktavi. To se postiže dodavanjem konstante argumentu logaritamske funkcije, odnosno [3]

$$L(f) = A - 10 \log(f^2 + B), \quad 20 \leq f \leq 20000 \quad (4)$$

gdje su veličine A i B konstante.

Razmatrajući sada relaciju (4) po dijelovima od po jedne oktave dobije se ovaj oblik:

$$L(2f) = A - 10 \log(4f^2 + B), \quad 20 \leq f \leq 20000 \quad (5)$$

pa za pravac s nagibom od -1 dB po oktavi vrijedi:

$$\Delta L = L(2f) - L(f) = 10 \log \frac{f^2 + B}{4f^2 + B} = -1, \quad (6)$$

odnosno:

$$10^{-0,1}(4f^2 + B) = f^2 + B \quad \text{ili} \quad B = 10,586f^2. \quad (7)$$

Srednja vrijednost konstante B unutar razmatranoga potpodručja za frekvencije 20 Hz, 40 Hz i 80 Hz iznosi $B \approx 29\,642$ pa relacija (4) poprima ovaj oblik:

$$L(f) = A - 10 \log(f^2 + 29642), \quad 20 \leq f \leq 20000 \quad (8)$$

Sada je još nužno odrediti vrijednost konstante A , te time postići moguću optimizaciju modela. Za tu svrhu će se koristiti metoda određivanja minimuma sume kvadrata razlika tipičnih razina spektra gustoće snage hidroakustičkoga šuma mora za određene frekvencije $L_H(f_i)$ i razina $L(f_i)$ izraženih pomoću relacije (8). Navedena će metoda dati optimalnu vrijednost za A . Stoga vrijedi

$$\frac{d}{dA} \sum_{i=1}^{10} [L_H(f_i) - L(f_i)]^2 = 0 \quad (9)$$

ili uvrštavajući relaciju (8) i derivirajući dobije se:

$$\sum_{i=1}^{10} [L_H(f_i) - A + 10 \log(f_i^2 + 29642)] = 0 \quad (10)$$

ili dalje sređujući za $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 \rightarrow f_i = 20, 40, 80, 160, 625, 1250, 2500, 5000, 10000, 20000$

dobije se na temelju Sl. 1 za $L_H(f_i) = 72, 71, 70, 69, 60, 54, 48, 42, 36, 30$ redom, pa relacija (10) postaje

$$A = \sum_{i=1}^{10} L_H(f_i) + 10 \sum_{i=1}^{10} \log(f_i^2 + 29642) = 116,0956. \quad (11)$$

Sada relacija (8) poprima konačan optimalan oblik, koji predstavlja matematički model razine spektra gustoće snage hidroakustičkog okolnog šuma dubokoga mora za čitavo frekvencijsko područje od 20-20000 Hz, odnosno

$$L(f) = 116,1 - 10 \log(f^2 + 29642), \quad 20 \leq f \leq 20000 \quad (12)$$

Suma kvadrata razlike tipičnih vrijednosti krivulje na Sl.1 i izračunatih vrijednosti na temelju dobivenoga matematičkog modela (12), odnosno

$$\epsilon = \sum_{i=1}^{10} [L_H(f_i) - L(f_i)]^2 = 0,93739 \quad (13)$$

pokazuje da je prilagodba modela empirijskoj tipičnoj krivulji vrlo dobra.

4. Statistički parametri Statistical parameters

Izjednačavajući relaciju (1) s relacijom (4) dobije se jednostrani spektar gustoće snage hidroakustičkoga šuma dubokoga mora [3], odnosno

$$l(f) = \frac{10^{A/10} I_0}{(f^2 + B)}, \quad 20 \leq f \leq 20\,000, \quad (14)$$

ili konačno

$$l(f) = \frac{2,607 \cdot 10^{-7}}{(f^2 + 29642)}, \quad 20 \leq f \leq 20\,000. \quad (15)$$

Sada se, na temelju relacije (14) lako dobije dvostrani spektar gustoće snage hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora, odnosno

$$l(\omega) = \frac{10^{A/10} 2\pi^2 I_0}{(\omega^2 + 4\pi^2 B)}, \quad 40\pi \leq |\omega| \leq 4\pi 10^4, \quad \omega = 2\pi f \quad (16)$$

ili konačno

$$l(\omega) = \frac{5,1465 \cdot 10^{-6}}{(\omega^2 + 1170219,3)}, \quad 40\pi \leq |\omega| \leq 4\pi 10^4, \quad \omega = 2\pi f. \quad (17)$$

4.1. Varijanca Variance

Da bi se odredila varijanca stohastičkoga procesa hidroakustičkog okolnog šuma dubokoga mora, nužno je izračunati srednju snagu za frekvencijsko područje od 20-20000 Hz, odnosno

$$\sigma^2 = \int_{20}^{20000} I(f) df, \quad (18)$$

ili pomoću (14)

$$\sigma^2 = I_0 10^{A/10} \int_{20}^{20000} \frac{df}{f^2 + B} = \frac{I_0 10^{A/10}}{B^{1/2}} \left(\arctg \frac{20000}{B^{1/2}} - \arctg \frac{20}{B^{1/2}} \right), \quad (19)$$

ili konačno

$$\sigma^2 = 2,19 \cdot 10^{-9}. \quad (20)$$

Ako se sada dobivena varijanca (20) za konačno frekvencijsko područje od 20-20000 Hz usporedi s teorijskom varijancom $(\sigma_\infty)^2$ za beskonačno frekvencijsko područje od 0- ∞ Hz, koja ima ovaj oblik

$$\sigma_\infty^2 = I_0 10^{A/10} \int_0^\infty \frac{df}{f^2 + B} = \frac{I_0 10^{A/10}}{B^{1/2}} \cdot \left(\arctg \frac{\infty}{B^{1/2}} - \arctg \frac{0}{B^{1/2}} \right), \quad (21)$$

ili konačno

$$(\sigma_\infty)^2 = 2,379 \cdot 10^{-9} \quad (22)$$

vidi se da je postotna razlika samo 7,9% pa se za ponešto grublji račun može koristiti teorijska vrijednost varijance, koja omogućava znatno jednostavnije razmatranje.

4.2. Funkcija korelacije Correlation function

Funkcija korelacije hidroakustičkog okolnog šuma dubokoga mora definirana je prema Wiener-Hinčinovu teoremu kao Fourierov par dvostranoga spektra gustoće snage (16). Stoga funkcija korelacije ima ovaj oblik

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (23)$$

gdje je parametar τ tzv. vrijeme korelacije. S obzirom da je spektar gustoće snage realna i parna funkcija te da je takva i funkcija korelacije, relacija (23) se može i ovako pisati

$$R(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty I(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad (24)$$

ili pomoću relacije (16)

$$R(\tau) = 2\pi I_0 10^{A/10} \int_0^\infty \frac{\cos(\omega\tau)}{\omega^2 + 4\pi^2 B} d\omega, \quad (25)$$

ili

$$R(\tau) = \frac{\pi I_0 10^{A/10}}{2\sqrt{B}} e^{-2\pi\sqrt{B}|\tau|} = R(0) e^{-2\pi\sqrt{B}|\tau|}, \quad (26)$$

ili konačno

$$R(\tau) = 2,379 \cdot 10^{-9} e^{-1081,7667|\tau|}. \quad (27)$$

4.3. Hipoteza ergodičnosti Ergodic hypothesis

Relacija (26) je vrlo prikladna da se potvrdi ergodičnost stohastičkoga procesa okolnoga hidroakustičkog šuma dubokoga mora. Naime, ako je stohastički proces ergodičan tada mora biti zadovoljena relacija

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = 0 \quad (28)$$

za koju je očigledno da je ispunjena.

5. Zaključak/Conclusion

U radu je sintetiziran matematički model razine spektra gustoće snage hidroakustičkog okolnog šuma dubokoga mora. Sinteza je obavljena temeljem jednoga tipičnog uzorka razine spektra gustoće snage, u frekvencijskome području od 20-20000 Hz, koji je moguće naći na nekoj lokaciji dubokoga mora.

Metodu određivanja relacije matematičkoga modela izabrao sam na temelju vlastitoga zaključivanja (konstanta B) i na temelju minimuma sume kvadrata razlika (konstanta A). Naknadna provjera izračunatih konstanta pomoću određivanja sume kvadrata pogrešaka dala je potvrdu vrlo dobrog približenja tipičnom uzorku ($\varepsilon = 0,93739$).

Sintetizirani matematički model razine spektra gustoće snage hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora omogućava analitičku procjenu ukupne srednje snage šuma (varijance stohastičkoga procesa šuma), jednostranoga i dvostranoga spektra gustoće snage šuma, kao i funkciju korelacije šuma na temelju koje se potvrđuje ergodička hipoteza stohastičkoga procesa hidroakustičkog okolnoga šuma dubokoga mora. Stoga je ideja o izvođenju matematičkoga modela šuma korisna i opravdana, a posebno za pasivnu podvodnu detekciju.

Literatura/References

- [1] Camp, L.: "Underwater Acoustics", Wiley - Interscience, New York, 1970.
- [2] Staškevič, A.P.: "Akustika morja", Sudostrojenje, Lenjingrad, 1966.
- [3] Ugrinović, K.: "Optimalne strukture obrade signala pasivne hidrolokacije", doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1990.
- [4] Urlick, R.J.: "Principles of Underwater Sound", Mc Graw-Hill, New York, 1975.
- [5] Urlick, R.J.: "Models for the amplitude fluctuations of narrow-band signals and noise in the sea", J. Acoust. Soc. Am. 62(1977)4, pp. 878-887.

Rukopis primljen: 14.5.2001.