



Kosta Ugrinović *

Mirko Bilić **

Olivera Pionić ***

ISSN 0469 - 6255
(173-179)

HIDROAKUSTIČKI ŠUM PLOVILA THE VESSEL'S UNDERWATER NOISE

UDK 534:656.61
Pregledni članak
Review

Sažetak

U radu se razmatraju vremenske i frekvencijske osobine hidroakustičkoga šuma plovila, za koji se pretpostavlja da je suma međusobno statistički nezavisnih dijelova koji nastaju kao posljedica različitih izvora zvuka na plovilu. Pokazuje se funkcija gustoće vjerojatnosti za anvelopu i trenutne vrijednosti valnog oblika signala hidroakustičkoga šuma plovila. Izvodi se izraz za spektar gustoće snage valnog oblika signala hidroakustičkoga šuma plovila.

Ključne riječi: plovilo, hidroakustički šum, funkcija gustoće vjerojatnosti, spektar gustoće snage.

Summary

The paper deals with the time and frequency characteristics of the vessel underwater noise. It is assumed that the vessel's underwater noise is a sum of statistically independent parts resulting from various sound sources on board. It is considered the probability density function for the envelope and for the instantaneous values of the vessel's underwater noise signal waveform. There has been carried out expression for the power density spectrum of the vessel's underwater noise signal waveform.

Key words: vessel, underwater noise, probability density function, power density spectrum.

1. Uvod Introduction

Svako plovilo, djelomično ili potpuno uronjeno u morski medij, može biti izvor hidroakustičkoga šuma (HA šuma), polje kojega doseže vrlo velike udaljenosti. HA šum plovila generiraju tri osnovne grupe izvora zvuka, i to:

- pogonski vijak (propeler) plovila,
- glavni i pomoćni strojevi i njihovi mehanizmi na plovilu,
- vibracije trupa ili dijelova trupa plovila.

Pogonski vijak je primarni uzrok nastajanja kavitacije na plovilu. Kavitacija nastaje na krilima pogonskoga vijka plovila ako brzina plovljenja dostigne tzv. kritičnu vrijednost. Tada hidrodinamički tlak na krilima pogonskoga vijka plovila postane manji od tlaka isparavanja morske vode. To prouzrokuje mjehuriće, koji nestajući, generiraju HA šum visoke razine. Kritična brzina plovljenja nije za plovilo konstantna, nego se mijenja s promjenom uvjeta u kojima se plovilo nalazi. Tako je za podmornice veća pri većim dubinama ronjenja. Stoga, povećavajući dubinu ronjenja podmornice sprječava se nastajanje kavitacije, iako se zadržava ona brzina plovljenja koja bi bila kritična za manje dubine ronjenja. Tako se smanjuje vjerojatnost otkrivanja podmornice pasivnim sonarom.

Ispitivanja pokazuju, da su trenutačne vrijednosti tlaka hidroakustičkoga polja (HA polja) onoga dijela HA šuma plovila, koji nastaje kao posljedica kavitacije na pogonskom vijku plovila, raspodijeljene po zakonu Gaussove razdiobe. Također se pokazuje, da je vremenski isječak toga dijela HA šuma plovila dopušteno razmatrati kao isječak stacionarnoga stohastičkog procesa, ali samo ako se režim plovljenja toga plovila ne mijenja ili ako su promjene toliko polagane da se u konkretnom vremenu promatranja smiju zanemariti.

Pogonski vijak plovila može i zujati. Zujanje je posljedica djelovanja hidrodinamičkih sila na krila pogonskoga vijka plovila, koja počnu vibrirati na svojoj rezonantnoj frekvenciji. Pogonski vijak plovila, koji zuji, intenzivno emitira hidroakustičku energiju na jednoj ili više diskretnih frekvencija.

* prof.dr.sci. Kosta Ugrinović, dipl. ing.
Fakultet prirodoslovno-matematičkih znanosti
i odgojnih područja, Sveučilišta u Splitu, Split

** mr.sci. Mirko Bilić, dipl. ing.
Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split

*** Olivera Pionić, prof. matematike i fizike
Elektrotehnička škola, Split

Glavni i pomoćni strojevi i njihovi mehanizmi za vrijeme svoga rada također proizvode HA šum plovila. Strojevi i mehanizmi u radu vibriraju stvarajući akustičko polje, koje preko brodske konstrukcije prodire u morski medij kao HA polje. Tako nastali HA šum plovila je izraženiji na većim brzinama plovljenja, ali može postojati i kada plovilo miruje. Tada ga proizvode pomoćni strojevi koji su u radu.

Vibracije trupa ili vibracije dijelova trupa, koje također proizvode HA šum plovila, nastaju zbog djelovanja hidrodinamičkih sila uslijed toka morske vode. Međutim, ovaj dio HA šuma plovila nije od velike važnosti, jer mu je razina znatno niža od ostalih dijelova cjelokupnoga HA šuma plovila.

HA šum plovila ovisi i o vrsti plovila. Svako plovilo ima svoj karakterističan HA šum, koji je za pasivni sonar dragocjena informacija. Na temelju te informacije može se, ne samo otkriti plovilo, nego i prepoznati ga. Mjera šumnosti plovila je tzv. "sposobnost plovila", koja se određuje prema povećanju razine njegova HA šuma pri povećanju brzine plovljenja. Tako primjerice opća razina HA šuma podmornice ne smije prijeći unaprijed određenu kritičnu vrijednost, jer u protivnome ta podmornica nije prikladna za ratne uvjete eksploatacije. Općenito je pokazano da je HA tlak šuma plovila u morskome mediju proporcionalan trećoj potenciji brzine plovljenja plovila.

2. Statističke osobine HA šuma plovila *Statistical characteristics of vessel's underwater noise*

Ako se HA šum plovila podijeli na dio uslijed rada strojeva i dio uslijed hidrodinamičkih sila, tada je negdje do 1 kHz pretežno koncentriran dio HA šuma plovila uslijed rada strojeva sa svojim tipičnim periodičnim komponentama, odnosno izraženim izdvojenim tonovima [1,2,11]. S obzirom da upravo takvi izraženi tonovi u HA šumu plovila olakšavaju njegovo otkrivanje pasivnim sonarom, jasno je od kolike je važnosti proučavanje njihovih svojstava.

Najznačajniji izvor HA šuma plovila je propulzivni stroj sa svojim pogonskim vijkom. On generira vrlo jaki stohastički dio HA šuma plovila i određeni broj periodičnih komponentata znatnog intenziteta. Za stohastički se dio HA šuma plovila smije tvrditi da je raspodijeljen po zakonu Gaussove razdiobe. Periodične su komponente u blizini plovila stabilne, i stvaraju polje HA šuma koje se ponaša po zakonu determinirane harmonijske funkcije. Međutim, periodične su komponente na mjestima udaljenim od plovila nestabilne, i stvaraju polje HA šuma koje se ponaša po zakonu harmonijske funkcije sa slučajnom amplitudom i fazom, odnosno stohastički. Ta stohastičnost je rezultat slučajne vremenske promjenjivosti parametara morskoga medija kao prijenosnoga puta od plovila do mjesta promatranja.

Stoga se HA šum plovila u njegovoj blizini ponaša kao suma Gaussova šuma i konačnoga broja stabilnih harmonijskih komponentata. S.O.Rice je pokazao statističku raspodjelu anvelope i trenutnih vrijednosti

takve sume. To je za anvelopu poznata Riceova funkcija gustoće vjerojatnosti

$$p(r, a) = \frac{r}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_s^2}\right] I_0\left(\frac{ra}{\sigma_s^2}\right), \quad (1)$$

a za trenutne vrijednosti je funkcija gustoće vjerojatnosti definirana pomoću konfluentne hipergeometrijske funkcije

$$p(y, a) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{y^2}{2\sigma_s^2}\right)^m {}_1F_1\left(m + \frac{1}{2}, 1, -\frac{a^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (2)$$

gdje je:

- $I_0(\cdot)$ - modificirana Besselova funkcija 1. vrste i 0-toga reda,
- ${}_1F_1(\dots)$ - konfluentna hipergeometrijska funkcija,
- a - amplituda harmonijske komponente,
- $(\sigma_s)^2$ - varijanca stohastičke komponente šuma plovila.

Funkcija (1) za $a=0$ postaje Rayleighjeva funkcija gustoće vjerojatnosti, dok za $\frac{ra}{\sigma_s^2} \gg 1$ postaje Gaussova funkcija gustoće vjerojatnosti s očekivanjem jednakim a .

Obavljena mjerenja u dubokome moru potvrdila su da se podvodni zvuk ponaša po zakonu Riceove statističke razdiobe [9].

S obzirom da šum plovila posjeduje više od jedne periodične komponente, dalja su istraživanja krenula u pravcu određivanja statističke raspodjele sume Gaussova šuma i dvije ili više periodičnih komponentata [3,4]. Općenito se konačan broj harmonijskih komponentata može prikazati ovim oblikom

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(2\pi f_i t + \vartheta_i) + n(t), \quad (3)$$

te koristeći poznatu relaciju i uzimajući f_0 kao srednju frekvenciju područja promatranja (3) postaje

$$y(t) = r \cos(2\pi f_0 t + \Theta), \quad (4)$$

gdje je:

- r - anvelope procesa,
- Θ - faza procesa, raspodijeljena po jednolikoj statističkoj razdiobi $[-\pi, +\pi]$.

Funkcija gustoće vjerojatnosti anvelope dobije se pomoću karakteristične funkcije procesa $F(\cdot)$, odnosno

$$p(r) = r \int_0^{\infty} x F(x) J_0(rx) dx, \quad (5)$$

gdje je:

$J_0(\cdot)$ - Besselova funkcija 1. vrste i 0-toga reda.

Funkcija gustoće vjerojatnosti trenutačnih vrijednosti dobije se na sličan način i iznosi

$$p(y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F(z) \cos(yz) dz. \quad (6)$$

$$p(r, a_1, a_2) = \frac{r}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{a_1^2}{2\sigma_s^2}\right)^m L_m^{(0)}\left(\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{n=0}^m \binom{m}{n}^2 \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{2n} \quad (7)$$

$$p(y, a_1, a_2) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{a_1^2}{2\sigma_s^2}\right)^m L_m^{(-1/2)}\left(\frac{y^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{n=0}^m \binom{m}{n}^2 \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{2n} \quad (8)$$

Konkretno, za $N=2$ izrazi (5) i (6) postaju redom (7) i (8), odnosno [3,4]

gdje je:

$L_m^{(k)}(\cdot)$ - Laguerreov polinom m -toga reda i k -toga parametra,
 a_1, a_2 - konstantne amplitude harmonijskih komponenata.

Ako broj harmonijskih komponenata postaje veći od dva, odnosno postaje tri, četiri, pet ili više, funkcija gustoće vjerojatnosti (7) teži prema Rayleighjevoj razdiobi, a funkcija gustoće vjerojatnosti (8) teži prema Gaussovoj razdiobi. Dovoljno dobra aproksimacija nastaje za $N5$ [6]. Stoga izgleda sasvim opravdano da se takvi signali, kao što su šumovi plovila, tretiraju kao Gaussovi slučajni procesi s Rayleighjevom razdiobom anvelope. Ova tvrdnja je u principu točna, iako se ne smije zaboraviti da periodične harmonijske komponente ipak postoje, te da mogu biti vrlo izražene i dovoljno stabilne da povećaju sposobnost otkrivanja šumnoga plovila pasivnim sonarom. Ovo je od naročite važnosti ako je broj izraženih i stabilnih periodičnih komponenata manji od pet.

Međutim, što se više udaljava od plovila, amplitude harmonijskih komponenata postaju nestabilnije, odnosno teže slučajnim varijablama, pa je pitanje kako će takve harmonijske komponente modificirati funkciju gustoće vjerojatnosti za anvelopu i za trenutačne vrijednosti šuma plovila.

Razmatranje je krenulo od oblika (3) u kojemu amplitude i faze postaju slučajne varijable, odnosno

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \Theta_i) + n(t), \quad (9)$$

gdje je svaki $A_i \geq 0$ statistički nezavisan od Θ_i , koji je jednoliko raspodijeljen na $[-\pi, +\pi]$. Još se pretpostavlja da su parovi (A_i, Θ_i) međusobno statistički nezavisni, te da su nezavisni i u odnosu na Gaussov šum $n(t)$, koji se pretpostavlja da je ograničen bijeli stacionarni Gaussov proces s nultim očekivanjem [4]. Sada se (9) može jednostavnije napisati kao

$$y(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \Theta(t)], \quad (10)$$

gdje je:

$A(t)$ - anvelopa stohastičkoga procesa,

$\Theta(t)$ - faza stohastičkoga procesa.

Tako su u [4] prikazani opći izrazi za funkciju gustoće vjerojatnosti anvelope (11) i trenutnih vrijednosti

(12) sume Gaussova šuma i proizvoljnoga broja periodičnih harmonijskih komponenata sa slučajnim amplitudama i statistički nezavisnim jednoliko raspodijeljenim fazama, i to

$$p(A) = \frac{A}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{1}{2\sigma_s^2}\right)^m L_m^{(0)}\left(\frac{A^2}{2\sigma_s^2}\right) v_M^{(2m)}, \quad (11)$$

$$p(y) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_s^2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{1}{2\sigma_s^2}\right)^m L_m^{(-1/2)}\left(\frac{y^2}{2\sigma_s^2}\right) v_M^{(2m)}, \quad (12)$$

gdje je:

$v_M^{(2m)}$ - definiran preko parnih momenata pojedinačnih harmonijskih komponenata.

3. Spektralne osobine HA šuma plovila Spectral characteristics of vessel's underwater noise

HA šum plovila posjeduje vrlo širok spektar gustoće snage (u daljem tekstu: spektar) koji se proteže od infrazvuka do ultrazvuka, a sačinjava ga kontinuirani širokopojasni dio i njemu superponirane diskretne komponente.

Kontinuirani dio spektra nastaje zbog djelovanja hidrodinamičkih sila na plovilo i pretežno je posljedica kavitacije na pogonskome vijku plovila. Razina mu ima izraženi maksimum u nižem frekvencijskome području i opada porastom frekvencije za 6 dB po oktavi, te je u frekvencijskome području od 100 Hz do 10 kHz proporcionalna recipročnoj vrijednosti kvadrata frekvencije. Izraženi se maksimum nalazi u frekvencijskome području od 100 Hz do 1 kHz, te se za veće brzine plovljenja ili za manje dubine ronjenja pomiče prema nižim frekvencijama. Taj dio spektra sadrži najveći dio energije HA šuma plovila [5].

Diskretne komponente spektra potječu od vremenski periodičnih pojava koje generiraju konačan broj tonova, a posljedica su rada strojeva i mehanizama kao i mogućeg zujanja pogonskoga vijka plovila. Taj se dio spektra pretežno nalazi u nisku tonfrekvencijskom području do 1 odnosno 2 kHz [5], iako su neki viši harmonici registrirani i u višemu tonfrekvencijskom području [1]. Taj je dio spektra HA šuma plovila

uglavnom nestabilan. Diskretne vrijednosti frekvencija tonova koji nastaju eventualnim zujanjem pogonskoga vijka plovila mogu se odrediti ovim izrazom

$$f_{0q} = qnw \text{ za } f_{0q} < f_{0,1+1} \text{ i za } q = 1, 2, \dots, Q, \quad (13)$$

gdje je:

- q - redni broj izraženoga tona,
- n - broj krila pogonskoga vijka plovila,
- w - broj okretaja osovine pogonskoga vijka plovila u 1 sekundi.

Zujanje se pogonskoga vijka plovila može smanjiti konstrukcijskim zahvatima na krilima vijka, kao što je primjerice povećanje njihova broja.

Spektar HA šuma plovila znatno ovisi i o brzini plovljenja. Kod manjih brzina plovljenja izraženiji je dio spektra u području nižih frekvencija i relativno je niska njegova opća razina. Povećanjem brzine plovljenja postaje izraženiji dio spektra u području viših frekvencija, a povećava se i njegova opća razina čemu najviše pridonosi HA šum pogonskoga vijka plovila, o čemu je već rečeno na kraju glave 1. ovoga rada. Vrlo je teško odrediti onu graničnu frekvenciju koja razdvaja pretežno diskretni dio spektra od pretežno kontinuiranog dijela. Prema svim ispitivanjima ta se frekvencija nalazi u području od 100 Hz do 1 kHz. Činjenica je da više šumna plovila imaju izraženiji kontinuirani dio spektra, dok manje šumna plovila imaju izraženiji diskretni dio spektra. Najmanje šumna plovila su podmornice kada plove u potpuno zaronjenom stanju.

4. Transformacija HA šuma plovila prolazom kroz medij *Vessel underwater noise transformation due to medium*

Svrha proučavanja HA šuma plovila je u njegovoj ulozi u otkrivanju samoga plovila pasivnim sonarom, hidrofoni koji su udaljeni od promatranoga plovila kao izvora HA šuma. Stoga treba uzeti u obzir i utjecaj morske vode kao akustičkoga medija na osobine HA polja šuma plovila, koje nastaje na mjestima njegova prijama hidrofona.

Što je plovilo više udaljeno od hidrofona to se njegov HA šum više razlikuje od izvornoga HA šuma, jer je njegovo HA polje dulje pod utjecajem stohastičkih osobina morske vode kao akustičkoga kanala prijenosa. Stoga HA šum plovila ima vremenske i frekvencijske fluktuacije, koje su posljedica propagacije kroz stohastički medij, te koje se očituju na oblik njegova spektra. U ustaljenim režimima plovljenja i bez većih fluktuacija medija, spektar HA šuma plovila je dovoljno stabilan i od neprocjenjive je vrijednosti za pasivnu hidrolokaciju. Ovo se naročito odnosi na izvorni diskretni dio spektra, koji se nalazi u niskome tonfrekvencijskom području i koji je vrlo značajan, jer omogućava lakše otkrivanje plovila pasivnim sonarom. Ovo stoga što je diskretni spektar izrazito različit od spektra šuma dubokoga mora u istome frekvencijskom području. Iskustveno se zna, da se pasivnim sonarom lakše detektira onaj HA šum plovila koji izvorno posjeduje i diskretni dio spektra. Propagacijom kroz sto-

hastički medij izvorne diskretne linije spektra HA šuma plovila doživljavaju frekvencijsko širenje, tako da se više ne govori o pojedinačnoj spektralnoj diskretnoj liniji, već o vrlo uskoj koncentraciji snage u okolišu diskretne frekvencije izvorne spektralne linije. Jasno je da ima smisla razmatrati takvu usku koncentraciju snage samo ako ona ima razinu koja nadvisuje razinu kontinuiranoga dijela spektra u tom frekvencijskom području. Stoga će se takve uske koncentracije snage u daljem tekstu nazivati "nadvišenja". Za frekvencijsku se širinu svakoga pojedinog nadvišenja smije pretpostaviti da iznosi oko 0,2 Hz [10], pa se takav stohastički proces smije smatrati uskopojasnim, zanemarujući njegov spektar za sve one frekvencije, koje su po svojoj apsolutnoj vrijednosti veće od dvostruke središnje frekvencije razmatranoga nadvišenja.

5. Matematički model spektra HA šuma plovila *Mathematical model of vessel underwater noise spectrum*

Riječ je o spektru prijenosom transformiranoga HA šuma plovila. Već je rečeno da se taj spektar sastoji od dva tipična dijela, koji su međusobno aditivni i statistički nezavisni. Prvi je dio pretežno posljedica kavitacije, koja nastaje na krilima pogonskoga vijka plovila. Drugi je dio pretežno posljedica rada strojeva i mehanizama te zujanja pogonskoga vijka plovila. S obzirom da je riječ o stacionarnima stohastičkim procesima moguće je odrediti matematički model njihovih spektara gustoće snage. Oni imaju determinirane vrijednosti razina koje se u praksi relativno jednostavno utvrđuju. U daljem razmatranju bit će obuhvaćeno frekvencijsko područje od 20 Hz do 10 kHz, jer je u tome području sadržan najveći dio hidroakustičke energije šuma plovila.

Razina kontinuiranoga dijela spektra HA šuma plovila, koji je posljedica kavitacije i koji nakon svoga maksimuma opada za oko 6 dB po oktavi, može se aproksimirati jedinstvenim matematičkim izrazom ovoga oblika [7]:

$$L_{pk} = C - 10 \log(f^2 + f_0^2) \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4, \quad (14)$$

gdje je:

C - konstanta,

f_0 - konstanta.

Na temelju (14) lako se dobije izraz za jednostrani oblik kontinuiranoga dijela spektra HA šuma plovila. S obzirom da, po definiciji, vrijedi za (14) i ovaj oblik

$$L_{pk} = 10 \log \frac{I_{pk}(f)}{I_0} \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4, \quad (15)$$

gdje je:

$I_{pk}(f)$ - jednostrani kontinuirani dio spektra HA šuma plovila,

$$I_0 = 0,64 \cdot 10^{-18}$$

Usporedbom (14) i (15) proizlazi izraz za jednostrani kontinuirani dio spektra HA šuma plovila, odnosno

$$I_{pk}(f) = \frac{C_0}{f^2 + f_0^2} \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4, \quad (16)$$

gdje je:

$$C_0 = 10^{0,1C} I_0.$$

Sada se lako dobiju svi ostali relevantni izrazi za opis kontinuiranoga dijela HA šuma plovila [7], i to:

- Dvostrani spektar

$$I_{pk}(\omega) = \frac{2\omega_0\sigma_{0\infty}}{\omega^2 + \omega_0^2} \text{ za } 40\pi \leq |\omega| \leq 2\pi 10^4, \quad (17)$$

gdje je:

$$\omega_0 = 2\pi f_0,$$

$$(\sigma_{0\infty})^2 = \pi C_0 / 2f_0 - \text{varijanca za } 0 \leq |\omega| \leq \infty.$$

- Funkcija korelacije

$$R_{pk}(\tau) = \frac{\pi C_0}{2f_0} \exp(-2\pi f_0 |\tau|) \quad i \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} R_{pk}(\tau) = 0, \quad (18)$$

- Srednja snaga

$$N_{pk} = \sigma_0^2, \quad (19)$$

- Vrijeme korelacije

$$\tau_{pk} = \frac{1}{2\pi f_0}. \quad (20)$$

Izvedeni matematički model kontinuiranoga dijela spektra HA šuma plovila sa popratnim relevantnim izrazima omogućava da se izvedu sljedeće tvrdnje: dio HA šuma plovila koji ima kontinuirani spektar smije se tretirati kao stacionaran i ergodičan (prema vrijednosti limesa za funkciju korelacije) Gaussov stohastički proces s nulnim očekivanjem, s konačnom varijancom i s eksponencijalnom funkcijom korelacije. Spektar mu je monotono padajući s nagibom od oko -6 dB po oktavi, a pretežni mu je dio energije (oko 90%) sadržan u razmatranome frekvencijskom području od 20 Hz do 10 kHz.

Razina diskretnoga dijela spektra HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva i mehanizama te zujanja pogonskoga vijka plovila, ima značajne specifičnosti. Njegov je spektar koncentriran oko konačnoga broja diskretnih frekvencija u nižemu tonfrekvencijskom području, pretežno do frekvencije od 1 kHz a najviše do 2 kHz. To su u stvari prijenosom transformirani izraženi tonovi izvornoga HA šuma plovila. Oni najviše dolaze do izražaja u spektru HA šuma onih plovila koja se kreću malim brzinama plovljenja.

Ako se razmatranje ograniči samo na osnovne izražene tonove na njihovom izvoru, oni su, kao i njihovi izvori, međusobno statistički nezavisni. Njihove frekvencije ne moraju biti međusobno mjerljive. Faze su im sigurno slučajne i distribuirane po zakonu jednolike razdiobe u intervalu $[0, 2\pi]$. Amplitude im i frekvencije na samom izvoru mogu, ali i ne moraju, biti konstantne. Međutim, emisijom njihove akustičke energije u morsku vodu, hidroakustičko im polje na svome putu propagacije od plovila do hidrofona doživljava razne transformacije. Te su transformacije posljedica prostorno-vremenske promjenjivosti morske vode kao akustičkoga medija i utjecaja njegovih

realnih granica: morskoga dna i morske površine. S obzirom da su navedene transformacije stohastičke to su amplituda, frekvencija i faza modulirani stohastičkim procesom. Promjenjivost frekvencije izvornoga izraženog tona može još nastati i zbog međusobnoga relativnog gibanja plovila prema hidrofona. Tada se može pretpostaviti da je frekvencija slučajna razijabla, koja je distribuirana po zakonu jednolike razdiobe u nekom intervalu, koji ovisi o razlici međusobnih brzina plovljenja.

Harmonici osnovnih izraženih tonova također doživljavaju stohastičke transformacije prouzrokovane propagacijom kroz medij. Stoga se i oni mogu promatrati kao harmonijski titraji modulirani stohastičkim procesima, koji im potpuno razgrađuju postojeću statističku zavisnost prema osnovnom izraženom tonu od kojega potječu. Dakle, i ovi se izraženi tonovi u HA šumu plovila smiju tretirati kao da su stohastički, međusobno statistički nezavisni procesi s koncentriranim srednjim snagama oko diskretnih frekvencija.

Prikladno je za matematički model valnoga oblika prijenosom transformiranoga q-toga izraženoga tona, odnosno q-toga nadvišenja, izabrati kvaziharmonijsku funkciju sljedećeg oblika [7].

$$s_q(t) = A_q(t) \sin[2\pi f_{0q}t + \Phi_q(t)] \text{ za } 0 \leq t \leq T \quad i \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (21)$$

gdje je:

$A_q(t)$ - stacionaran i ergodičan stohastički proces amplitude q-toga nadvišenja HA šuma plovila,

$\Phi_q(t)$ - stacionaran i ergodičan stohastički proces argumenta q-toga nadvišenja HA šuma plovila,

f_{0q} - središnja frekvencija frekvencijskoga područja q-toga nadvišenja HA šuma plovila.

Činjenica je, da izvorni izraženi ton tijekom propagacije doživljava širenje svoje spektralne linije te izvjesnu nestabilnost amplitude izraženu stohastičkim procesom. Takav se transformirani "ton" smije sada promatrati kao stacionaran i ergodičan Gaussov stohastički proces s nulnim statističkim očekivanjem, s konačnom varijancom i s koncentracijom pretežne količine snage u uskom području oko frekvencije f_{0q} . Navedena se transformacija može razmatrati i kao posljedica djelovanja multiplikativne smetnje tokom propagacije na izvorni izraženi ton [8]. Prikladan matematički model za takav jednostrani spektar q-toga nadvišenja je sljedeći

$$I_{pg}(f) = \frac{C_q}{(f - f_{0q})^2 + f_q^2} \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4, \quad (22)$$

gdje je:

f_{0q} - središnja frekvencija q-toga nadvišenja,

f_q - konstanta,

C_q - konstanta.

Sada se lako dobiju svi ostali relevantni izrazi za opis q-toga nadvišenja HA šuma plovila [7], i to:

- Dvostrani spektar
gdje je:

$$I_{pq}(\omega) = \frac{\omega_q \sigma_{q\infty}^2}{(\omega - \omega_{0q})^2 + \omega_q^2} + \frac{\omega_q \sigma_{q\infty}^2}{(\omega + \omega_{0q})^2 + \omega_q^2} \text{ za } 40\pi \leq |\omega| \leq 2\pi 10^4 \quad (23)$$

$(\sigma_{q\infty})^2 = \pi C_q / f_q$ - varijanca stohastičkoga procesa q-toga nadvišenja za $0, \leq |\omega| \leq \infty$,

$\omega_{0q} = 2\pi f_{0q}$ - središnja kružna frekvencija q-toga nadvišenja,

$\omega_q = 2\pi f_q$ - konstanta.

- Funkcija korelacije

$$R_{pq}(\tau) = \frac{\pi C_q}{f_q} \exp(-2\pi f_q |\tau|) \cos(2\pi f_{0q} \tau) \text{ i } \lim_{\tau \rightarrow \infty} R_q(\tau) = 0 \quad (24)$$

- Srednja snaga

$$N_{pq} = \sigma_{q\Delta}^2 = 20 C_q \arctg(5\Delta), \quad (25)$$

gdje je:

Δ - širina frekvencijskoga područja q-toga nadvišenja za $N_{pq} > 0,9(\sigma_{q\infty})^2$.

- Vrijeme korelacije

$$\tau_{pq} = \frac{1}{2\pi f_q} \quad (26)$$

Nakon provedenoga razmatranja svih izraza za q-to nadvišenje lako je napisati matematički model za jednostrani diskretni dio spektra HA šuma plovila, koji prema (22) postaje

$$I_{pd}(f) = \sum_{q=1}^Q I_{pq}(f) = \sum_{q=1}^Q \frac{C_q}{(f - f_{0q})^2 + f_q^2} \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4 \quad (27)$$

Izvedeni matematički model diskretnoga dijela spektra HA šuma plovila sa popratnim relevantnim izrazima omogućava da se izvedu sljedeće tvrdnje: dio HA šuma plovila koji ima diskretni spektar smije se tretirati kao suma konačnoga broja međusobno statistički nezavisnih stacionarnih i ergodičkih (prema vrijednosti limesa za funkciju korelacije) Gaussovih stohastičkih procesa s nultim statističkim očekivanjima, s konačnim varijancama i s eksponencijalno prigušenim kosinusnim funkcijama korelacije. Spektar mu je također suma konačnoga broja pojedinačnih spektara, kojima su pretežni iznosi energija (preko 90%) koncentrirani u uskim frekvencijskim područjima u okolišu diskretnih središnjih frekvencija područja, te koje odgovaraju diskretnim frekvencijama izraženih tonova izvornoga HA šuma plovila u razmatranome frekvencijskom području od 20 Hz do 10 kHz.

6. Zaključak Conclusion

Konačno se može zaključiti da je HA šum plovila složen te da je suma od dva tipična dijela koji su međusobno statistički nezavisni i ponašaju se prema Gaussovoj razdiobi s nultim statističkim očekivanjima. Stoga se valni oblik signala HA šuma plovila na izlazu hidrofona može prikazati ovim oblikom

$$y_p(t) = y_{pk}(t) + y_{pd}(t) \text{ za } 0 \leq t \leq T$$

gdje je:

$y_{pk}(t)$ - valni oblik signala HA šuma plovila koji je posljedica kavitacije,

$y_{pd}(t)$ - valni oblik signala HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva, mehanizama i zujanja pogonskoga vijka plovila.

Već je ranije zaključeno da je svaki pojedini dio u (28) statistički nezavisan stacionaran ergodički Gaussov proces s nultim statističkim očekivanjem i s konačnom varijancom. Stoga je i HA šum plovila, kao suma tih pojedinih dijelova, stacionaran ergodički Gaussov proces s nultim statističkim očekivanjem i s konačnom varijancom, koji se prima hidrofonom u konačnom vremenu T .

Sasvim se analogno može zaključiti i za spektar signala valnoga oblika HA šuma plovila, koji je također suma specifičnih dijelova, odnosno

$$I_p(f) = I_{pk}(f) + I_{pd}(f) \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4, \quad (29)$$

ili pomoću (27)

$$I_p(f) = I_{pk}(f) + \sum_{q=1}^Q I_{pq}(f) \text{ za } 20 \leq f \leq 10^4 \quad (30)$$

Spektar (30) obuhvaća uglavnom frekvencijsko područje od 20 Hz do 10 kHz. Navedena nadvišenja diskretnoga dijela spektra su specifikum, koji može utjecati na povećanje vjerojatnosti detekcije pri njegovoj obradi pasivnim sonarom.

Na temelju izloženoga mogu se za valni oblik signala HA šuma (pretpostavljajući da se signal prima u vremenu $0 \leq t \leq T$) propušta u frekvencijskome području $20 \leq f \leq 10^4$) napisati ovi bitni izrazi:

- Za varijancu

$$\sigma_{py}^2 = \sigma_{pk}^2 + \sigma_{pd}^2 \text{ ili za } \sigma_{pd}^2 = \sum_{q=1}^Q \sigma_{pq}^2 \text{ slijedi konačno} \quad (31)$$

$$\sigma_{py}^2 = \sigma_{pk}^2 + \sum_{q=1}^Q \sigma_{pq}^2 \quad (32)$$

gdje je:

$(\sigma_{pk})^2$ - varijanca valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica kavitacije,

$(\sigma_{pd})^2$ - varijanca valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva, mehanizama i zujanja pogonskoga vijka plovila.

- Za funkciju korelacije

$$R_{py}(\tau) = R_{pk}(\tau) + R_{pd}(\tau) \text{ ili za } R_{pd}(\tau) = \sum_{q=1}^Q R_{pq}(\tau) \quad (33)$$

slijedi konačno

$$R_{py}(\tau) = R_{pk}(\tau) + \sum_{q=1}^Q R_{pq}(\tau), \quad (34)$$

gdje je:

$R_{pk}(\tau)$ - funkcija korelacije valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica kavitacije,

$R_{pd}(\tau)$ - funkcija korelacije valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva, mehanizama i zujanja pogonskoga vijka plovila.

- Za dvostrani spektar

$$I_{py}(\omega) = I_{pk}(\omega) + I_{pd}(\omega) \text{ ili za } I_{pd}(\omega) = \sum_{q=1}^Q I_{pq}(\omega) \quad (35)$$

slijedi konačno

$$I_{py}(\omega) = I_{pk}(\omega) + \sum_{q=1}^Q I_{pq}(\omega) \quad (36)$$

gdje je:

$I_{pk}(\omega)$ - dvostrani spektar valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica kavitacije,

$I_{pd}(\omega)$ - dvostrani spektar valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva, mehanizama i zujanja pogonskoga vijka plovila.

- Za jednostrani spektar

$$I_{py}(f) = I_{pk}(f) + I_{pd}(f) \text{ ili za } I_{pd}(f) = \sum_{q=1}^Q I_{pq}(f) \quad (37)$$

slijedi konačno

$$I_{py}(f) = I_{pk}(f) + \sum_{q=1}^Q I_{pq}(f) \quad (38)$$

gdje je:

$I_{pk}(f)$ - jednostrani spektar valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica kavitacije,

$I_{pd}(f)$ - jednostrani spektar valnog oblika signala HA šuma plovila koji je posljedica rada strojeva, mehanizama i zujanja pogonskoga vijka plovila.

Provedena razmatranja su baza za sintezu optimalne strukture za obradu valnog oblika signala HA šuma plovila i za ocjenu njezine kvalitete u procesu detekcije [7].

Literatura

References

[1] Albers, V.M.: "Gidroakustičeskie pribori i izmerenija", MIR, Moskva, 1972.

[2] Albers, V.M.: "Underwater Acoustic Instrumentation", Instrument Society of America, Pittsburgh, Pennsylvania, 1969.

[3] Esposito, R., Wilson, L.R.: "Statistical Properties of two Sine Waves in Gaussian Noise", IEEE Trans. of Inform. Theory, IT-19(1973)2, pp. 176-183.

[4] Goldman, J.: "Statistical Properties of a Sum of Sinusoids and Gaussian Noise and its Generalization to Higher Dimensions", Bell System Technical Journal 53(1974)4, pp. 557-580.

[5] Knight, W.C., Pridham, R.G., Kay, S.M.: "Digital Signal Processing for Sonar", Proceedings of the IEEE 69(1981)11, pp. 1451-1506.

[6] Lorber, H.W., Burns, J.D.: "The SQUOD: A Versatile and Accurate Scheme for Measuring Signal Strength", IEEE Trans. on Inform. Theory, IT-19(1973)1, pp.37-43.

[7] Ugrinović, K.: "Optimalne strukture obrade signala pasivne hidrolokacije", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1990.

[8] Ugrinović, K., Pionić, O.: "Model of Received Underwater Signal Spectrum Level", Proceedings of the 40th International Symposium on Electronics in Marine, Zadar, 1998, pp. 287-290.

[9] Urick, R.J.: "Models for the Amplitude Fluctuations of Narrow-band Signals and Noise in the Sea", JASA 62(1977)4, pp. 878-887.

[10] Urick, R.J.: "Multipath Propagation and its Effects on Sonar Design and Performance in the Real Ocean", Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Portovenere, La Spezia, Italy, Part 1, pp. 3-18; Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1977.

[11] Urick, R.J.: "Principles of Underwater Sound", Mc Graw-Hill, New York, 1975.

Rukopis primljen: 18. 9. 1998.