

TÄYDEN MITTAKAAVAN LAIVAPOTKURIN MELULÄHDEMALLIN MUODOSTAMINEN

Jukka Tanttari^{1,a}, Antti Hynninen^{1,b}

¹ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

^a PL 1300, 33101 Tampere; ^b PL 1000, 02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

Tiivistelmä

Laivojen vedenalaisen melun hallinta on tärkeä osa merten ympäristönsuojelua. Alusten suuri koko ja lähteiden fysikaalinen monimutkaisuus tekevät melupäästön ennakoinnista sekä normien mukaisesta kaukokentässä mittaamisesta haastavaa ja kallista. Tiivistetty melulähdemalli (korvauslähdemalli) kuvaa alkuperäisen lähdejakauman joukolla diskreettejä alkeislähteitä. Ideana on kalibroida lähdevoimakkuudet siten, että malli tuottaa saman ulkoisen melupäästön kuin primääri, monimutkaisempi lähde. Mallin etu on laskennallinen keveys ja sitä kautta hyvä suora soveltuvuus eritasoisiin etenemismalleihin. Toinen etu on mahdollisuus korvata kalliita täyden mittakaavan kaukokenttämittaukset lähteen lähikenttämittauksiin (esim. äänenpainejakauma aluksen rungolla) perustuvalla mallilla. Korvauslähdemallin muodostamisessa voidaan hyödyntää myös aluksen rungon värähtelyvasteita vibroakustisia vastaavuoroisuusperiaatteita käyttäen (Rayleighin & Lyamshevin käänteisyysperiaate). Korvauslähdemallinnuksen käytännön soveltamiseen täydessä mittakaavassa liittyy sekä mahdollisuuksia että haasteita. Näitä havainnollistetaan eritasoisilla akustisilla malleilla. Sovellusesimerkkinä on jäänmurtaja Polariksen potkurin melu. Mallin laatimisessa ja sen oikeellisuuden testaamisessa hyödynnetään potkurin virtaus- ja hydroakustiikkasimulointeja.

1 JOHDANTO

Monimutkaisten laskentamallien rinnalla on hyvä olla käytettävissä yksinkertaistettuja malleja, joilla voidaan nopeasti tuottaa riittävän tarkkoja tuloksia lähteen äänensäteilystä. Tiivistetty melulähdemalli (korvauslähdemalli) on eräs käyttökelpoinen vaihtoehto.

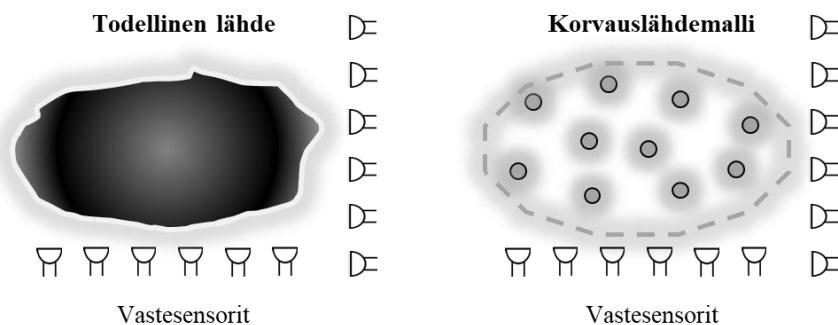
2 KORVAUSLÄHDEMALLI

Idea ja periaate

Korvauslähdemallin idea on kuvata alkuperäinen, jatkuva lähdejakauma joukolla diskreettejä alkeislähteitä, Kuva 1. Niiden lähdevoimakkuudet kalibroidaan siten, että malli tuottaa riittävän tarkasti saman ulkoisen melupäästön kuin alkuperäinen lähde.



© 2023 Jukka Tanttari, Antti Hynninen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1. Korvauslähdemallin periaate

Korvauslähdemallin teoriaa ja soveltamista malliskaalan potkuriin on esitelty lyhyesti viitteissä [1, 2]. Mallin muodostamiseen tarvitaan lähteiden ja sensoreiden välinen siirtomatriisi $[H]$, joka sisältää sensoreiden vasteet yksikköherätteille. Lähdevoimakkuusvektori $\{q\}$ saadaan havaitun vastevektorin $\{p\}$ ja siirtomatriisin (pseudo)inverssin $[H^+]$ kautta. Perusteellinen teoriakatsaus, ks. [3]. Korvauslähdemallien yleisessä suunnittelussa, siirtomatriisin tuottamisessa sekä testauksessa hyödynnetään reunaelementtimalleja (Boundary Element Method - BEM).

Lähtötiedot, ennakkosuunnittelu ja mallille asetettavat tavoitteet

Ennen korvauslähdemallin muodostamista on hyvä selvittää, mitä lähteen luonteesta ja sen geometriasta tiedetään ennalta, mitä akustisia suureita mallin tulee tuottaa sekä mitä tietoa on saatavissa mittausten tai muiden mallien kautta. Akustiikan melupäästön (laajasti ymmärrettynä) tyyppitapauksia ovat ääniteho (emissio), äänitehon suuntaavuus sekä kompleksinen äänenpainejakauma jollakin etäisyydellä tai pistejoukossa.

Vapaassa avaruudessa oleva suuntaamaton akustinen pistemonopoli tuottaa halutun äänitehon, kun sen tilavuusnopeus kalibroidaan sopivasti. Näin ollen korvauslähdemalli voi olla hyvin yksinkertainen käsittäen yhden lähteen.

Vaativissa tapauksissa käytetään useiden lähteiden ja sensoreiden yhdistelmää. Yleensä malli on ylimääritelty, ts. sensoreita on enemmän kuin lähteitä. Laboratoriotutkimuksissa sensorihila voidaan virittää optimaalisesti. Näin voidaan tuottaa malleja, jotka tuottavat paitsi äänitehon, myös äänikentän yksityiskohtat hyvin tarkasti. Viitteitä lähde- ja sensoripisteiden valinnan perussäännöistä, ks. [3]. Kehittyneimpien mallien kalibroinnissa voi olla mukana myös lähteen paikka tai lähteen impedanssi [4, 5]. Yleensä käytetään monopoleja. Dipolien myötä tulee lisämuuttujia, jotka tekevät mallin kalibroinnista työläämpää.

Eräitä käytännön haasteita liittyen erityisesti laivojen vedenalaiseluun

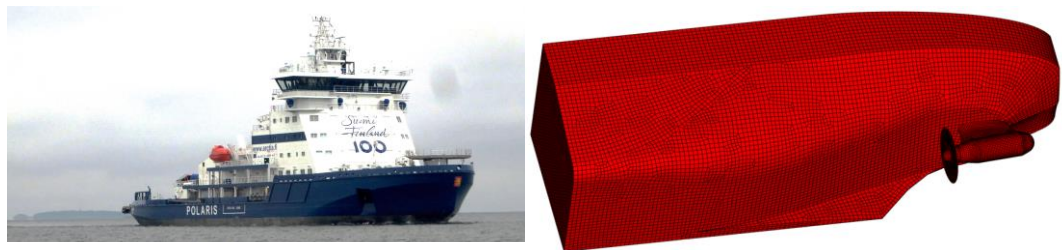
Korvauslähdemenetelmän soveltamisessa laivojen vedenalaiseen meluun on useita käytännön haasteita:

- Hydrodynaamisella (potkuri, turbulenssit) lähdealueella ei ole selviä, teräviä rajoja.
- Lähdealue ei ole vapaassa avaruudessa, vaan lähellä laivan runkoa ja vesi/ilma -rajapintaa. Nämä vaikuttavat korvauslähteiden kalibrointiin.
- Kokeellista äänitehotietoa tai äänikentän yksityiskohtia ei ole saatavissa. Normien mukainen äänenpainemittaus tehdään aluksen ohiajon aikana kaukokentässä.
- Merenpohjan vaikutus voi monimutkaistaa tilannetta. Nykyään voidaan normien mukaan mitata hyvin matalissa vesissä (30 m), joissa pienimmät taajuudet eivät etene (cutoff).

3 LAIVAPOTKURIN KORVAUSLÄHDEMALLIN RAKENTAMINEN

Aluksen runko, potkuri ja CFD-CHA-laskenta

Mallin lähtökohta on kuvassa 2 oleva alus ja sen osittainen geometria. Leveysuunnassa geometria käsittää puolet aluksesta. Myös pituus suunnassa rakenne on katkaistu. Ajatuksena on, että yksinkertaistaminen ei vaikuta lähellä potkuria ja erilaisilla reunaehdoilla (leveyssymmetria, pinnan vaikutus) voidaan ympäristö huomioida riittävän hyvin. Merenpohjaa ei huomioida. Potkuri (kuvan 2 kiekko) on 4-lapainen ja sen ulkohalkaisija on 5 metriä.



Kuva 2. Jäänmurtaja Polaris ja aluksen peräosan STEP-malli volyymina. Potkurikehä kiekkona.

Potkurin aiheuttama hydrodynaaminen turbulenttinen virtauskenttä sekä kavitaatioilmiöt voidaan ratkaista tarkasti laskennallisen virtaustekniikan menetelmin (Computational Fluid Dynamics - CFD). Akustisia analogioita käyttäen CFD tuloksista muodostetaan lähde-ermit elementtimenetelmämalliin (Finite Element Method - FEM) jolla simuloidaan äänikentän käyttäytymistä aluksen rungon läheisyydessä. CFD tuloksista saadaan lähtötiedot hydroakustiikkasimulointeihin (Computational Hydroacoustics - CHA). CFD-CHA laskentaa on kuvattu tarkemmin viitteessä [1]. Äänikentän käyttäytyminen ratkaistiin välillä 1.25–120 Hz, taajuusresoluutiolla 1.25 Hz. Hydrodynaamisen lähteen aiheuttama akustinen painekenttä potkurin lapataajuudella 5 Hz on esitetty kahdella tapaa kuvassa 3.

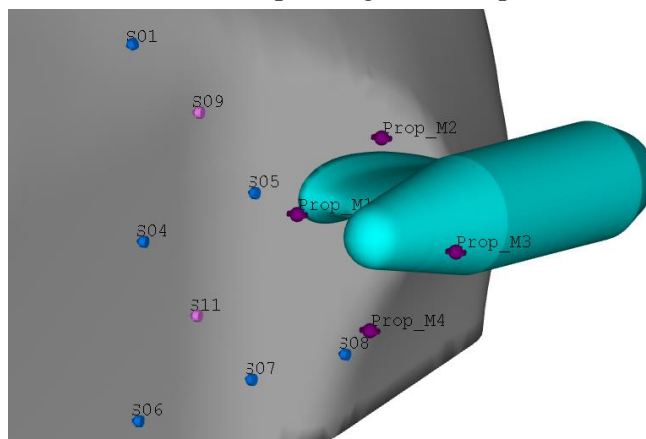


Kuva 3. Hydrodynaamisen lähteen aiheuttaman akustisen painekentän esitystapoja. Vasemmalla potkurin lapataajuinen paineenvaihtelu kuvattuna väreinä, oikealla tasa-arvokäyrinä.

Korvauslähdemallit

Erilaisia korvauslähdemalleja (Kuva 4) tehtiin 12. Malleissa oli 4, 8 tai vain 1 monopoli-lähde. Lähteiden paikka potkurikehällä (4 tai 8 lähdeä) oli kohdassa 75 % potkurin lavan pituudesta. Yhden monopolin malleilla testattiin kolmea eri lähdepaikkaa: 1) lähde potkurin navassa, 2) potkurikehällä lähinnä runkoa, 3) kehällä kauimpana rungosta. Sensoreita oli yhteensä 12, joista hyödynnettiin 7, 8 tai 10 kappaletta. Tiedot sensoripaikat

osoittautuivat heti hankaliksi, eikä niitä käytetty malleissa. Kyseiset paikat olivat liian lähellä pintaa, jolloin sensorien tuottama painesignaali oli epämääräinen ja heikko.



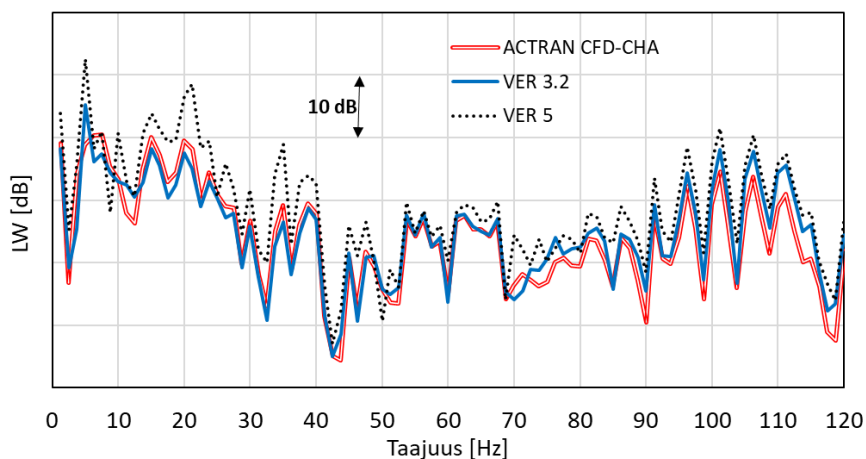
Kuva 4. Korvauslähdemallin (VER 3.2) asetelmä BEM-mallissa. Mallissa on 4 monopoli-lähdettä potkurikehällä (violettit M1, M2, M3, M4) sekä 8 painesensoria aluksen rungolla (siniset ja vaaleanpunaiset).

4 TULOKSIA

Potkurin äänitehotaso: korvauslähdemalli vs. CFD-CHA

Suurin, 8 lähteen ja 10 sensorin malli tuotti 6.7 dB äänitehotason yliarvion. Malli, jossa oli yksi lähde lähimpänä aluksen runkoa ja 10 sensoripistettä, tuotti vastaavasti 4.3 dB aliarvion. Suurimmalla osalla kokeilluista malleista tarkkuus oli parempi kuin ± 2 dB, parhaiden mallien tarkkuuden ollessa ± 0.5 dB.

Kuvassa 5 on verrattu suurimman yliarvion antaneen mallin (VER 5) sekä tarkimman mallin (VER 3.2) antamia äänitehospektrejä CFD-CHA-laskennan tulokseen. Yliarvion tuottaneessa mallissa poikkeamat olivat suurimmat lapataajuudella 5 Hz ja sen alimmilla kerennaisilla. Suuremmilla (yli 40 Hz) taajuuksilla poikkeamat sekä erot mallien välillä olivat pienempiä.



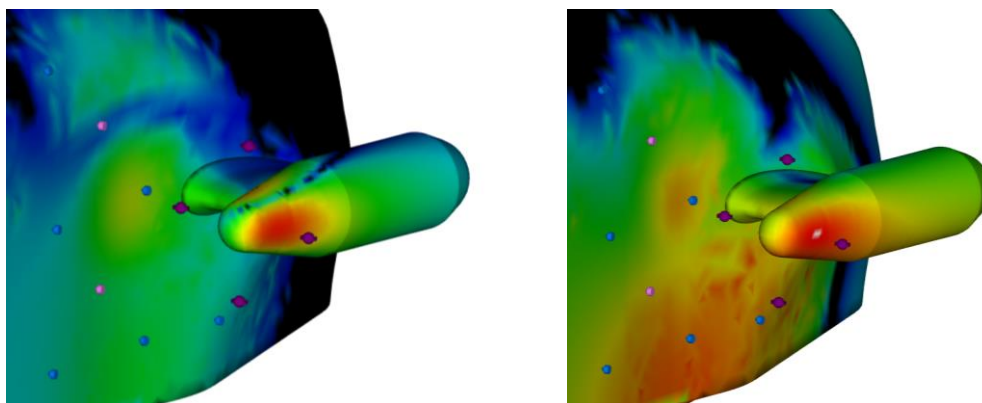
Kuva 5. Korvauslähdemallin tuottamia äänitehotasoja. Korvauslähdemalli VER 3.2 (4 lähdetä ja 8 sensoria) vs. CFD-CHA ratkaisu: + 0.4 dB, Korvauslähdemalli VER 5 (8 lähdetä ja 10 sensoria) vs. CFD-CHA ratkaisu: + 6.7 dB.

Myös yhden lähteen mallit tuottivat äänitehotason kohtuullisen tarkasti. Suurimman aliarvion (-4.3 dB) tuottaneessa mallissa lähde oli potkurikehällä lähellä sensoripisteitä (noin 1.3 m aluksen rungosta), jolloin äänenpaine sensoripisteissä voitiin tuottaa pienemmällä lähdevoimakkuudella. Kun lähde sijoitettiin kauas rungosta (noin 5 m), tarvittiin suurempi lähdevoimakkuus ja malli tuotti noin 1.7 dB äänitehotason yliarvion. Potkurin navan tasalla (noin 3.1 m rungosta) ollut lähde tuotti 1.6 dB aliarvion.

Äänenpaine aluksen rungolla, korvauslähdemalli vs. CFD-CHA

Kuvassa 6 on verrattu tarkan korvauslähdemallin (VER3.2) antamia äänenpainetasoja sensoripisteissä CFD-CHA-mallin antamiin tuloksiin potkurin lapataajuuden kerrannaisilla alueella 5–60 Hz. Vastaavuus on keskimäärin varsin hyvä, ollen paras pisteissä 4–7 sekä 9. Etäällä olevissa pisteissä 1 ja 8 vastaavuus on huonoin, mutta 4 dB sisällä. Liian lähellä pintaa olleissa, poistetuissa sensoripisteissä vastaavuus oli huonoimmillaan ± 11 dB. Mallien testaaminen huonojen valintojen karsimiseksi oli siten hyödyllistä.

Taajuus [Hz]	S01 P	S04 P	S05 P	S06 P	S07 P	S08 P	S09 P	S11 P
5	3.1	1.7	-0.1	2.9	3.2	2.4	-1.4	-3.8
10	3.7	-1.4	-0.3	-1.0	0.9	3.4	-1.1	-1.6
15	1.4	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.8	-0.6	0.9
20	1.0	-0.1	-0.1	0.1	-0.3	-1.2	-0.5	1.2
25	1.6	-0.4	0.0	-0.7	-0.3	0.3	-0.5	0.4
30	1.1	-0.3	-0.1	0.0	-0.2	-0.6	-0.4	0.6
35	1.1	0.1	-0.4	0.7	-0.2	-2.2	-1.0	1.7
40	0.9	0.0	-0.1	0.2	-0.3	-1.1	-0.7	1.2
45	1.5	0.1	-0.2	0.4	-0.3	-1.2	-0.6	1.2
50	2.1	0.7	-0.2	0.2	-0.7	-1.7	-1.3	1.9
55	1.3	0.0	-0.2	0.1	-0.4	-0.8	-0.5	1.2
60	-0.1	1.4	-0.2	2.2	-0.7	-3.4	-0.9	3.0
65	1.5	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	-0.9	-0.8	1.3
70	0.2	0.2	0.1	3.8	-0.1	-2.5	-0.1	-0.1
75	0.0	-1.5	-0.3	-0.9	0.5	0.2	0.6	0.2



Kuva 6. Ylempi kuva: korvauslähdemallin sensoripisteisiin tuottaman äänenpainetason tarkkuus, VER3.2 vs. CFD-CHA. Punainen = yliarvio > 2 dB, sininen = aliarvio > 2 dB; keltainen = poikkeama 1-2 dB, vihreä = poikkeama < 1 dB. Alempi kuva: äänenpainejakaumat 5 Hz ja 75 Hz, dynamiikka 40 dB (5 Hz) ja 30 dB (75 Hz).

5 POHDINNAT JA YHTEENVETO

Tässä paperissa raportoitiin kokemuksia korvauslähdemenetelmän käytöstä potkurimelun mallinnukseen ja simulointiin täydessä mittakaavassa. Vertailukohtana ja mallien rakentamisen pohjana käytettiin CFD-CHA-simulointien antamia tuloksia. Tukena käytettiin myös BEM-mallinnusta.

Korvauslähdemallien tarkkuus oli hyvä. Niillä päästiin jopa ± 0.5 dB vastaavuuteen kokonaisäänitehotasossa. Tarkkuus äänitehotason suhteen oli heikointa (kokonaistasossa $+6.7$ dB) mallilla, jossa oli suurin määrä (8 kpl) lähteitä. Pienemmät mallit, joissa oli neljä tai vain yksi lähde, toimivat paremmin. Taajuustasossa tarkkuus oli heikointa lapataajuudella 5 Hz ja sen alimmilla kerrannaisilla. Suuremmilla taajuuksilla mallien välillä ei ollut eroja.

Suurimman yliarvion antaneen mallin todennäköinen ongelma oli, että mallin lähteet olivat liian tiheässä verrattuna etäisyyteen sensoripisteisiin ja sensoripisteiden keskinäisiin etäisyyksiin. Tämä soti tiettyjä perussääntöjä vastaan: 1) sensoripisteiden keskinäiset etäisyydet r_{mm} kannattaa pitää lähellä lähteiden keskinäisiä etäisyyksiä r_{ss} ja 2) lähdepisteiden ja sensoripisteiden välinen keskimääräisen etäisyyden r_{ms} on hyvä olla lähellä etäisyyksiä r_{ss} ja r_{mm} [3]. Lapataajuuden ja sen kerrannaisten liiallinen korostuminen liittyy erityisesti liian tiheässä oleviin lähteisiin ja herkkyyteen lähteiden keskinäiselle vaihteistukselle.

Korvauslähdemalli on kätevä ja kevyt. Myös yhden monopolin malli voidaan sensorien avulla virittää tuottamaan varsin tarkasti oikea äänitehotaso. Eräs opetus on käyttää minimimäärä korvauslähteitä huomioiden samalla perussäännöt lähteiden ja sensoreiden keskinäisistä etäisyyksistä. Asia toki vaatisi hieman jatkotutkimuksia potkurisovellukseen liittyen. Mallien tarkkuuden ja erottelukyvyn kannalta olisi ideaalista, mikäli voitaisiin käyttää tiheää sensorihilaa potkurin edessä. Tämä ei käytännössä ole mahdollista, mikäli mitauksia tehdään oikeilla paineantureilla virtuaalimallien ja -sensoreiden sijasta.

Menetelmää voitaisiin hyödyntää siten, että aluksen rungolla olevien paineantureiden västeiden avulla muodostettaisiin korvauslähdemalli, jolla sitten simuloitaisiin äänenpainetta kaukokentässä. Yksi jatkotutkimuskohde olisi myös normien mukaisen kaukokenttämittauksen tulosten mallintaminen. Menettelyllä voitaisiin mahdollisesti korvata kalliita mitauksia ulkomailla sijaitsevilla erityisillä mittausradoilla.

6 KIITOKSET

Työ tehtiin VTT:n omarahoitteisessa *FullProp* projektissa. Lähtötietoina käytettiin Business Finlandin rahoittaman *PropNoise* projektin virtaussimulointituloksia.

VIITTEET

[1] Hynninen, A. & Tanttari, J. Laivapotkurin tiivistetty melulähdemalli. Akustiikkapäivät 2021, Turku.

[2] Tanttari, J. & Hynninen, A. Acoustic source characterization of marine propulsors. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (9) (2022).
<https://doi.org/10.3390/jmse10091273>

[3] Nelson, P. A., & Yoon, S. H. Estimation of acoustic source strength by inverse methods: Part I, conditioning of the inverse problem. *Journal of Sound and Vibration*, 233(4), 639–664, 2000. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2837>

[4] Ochmann, M. & Piscoya, R. Theory and Application of Acoustic Sources Using Complex Analysis, 2021. doi:10.1007/978-981-33-6040-2.

[5] Lee, S. Review: The Use of Equivalent Source Method in Computational Acoustics, *Journal of Computational Acoustics* 25 (1) (2017) 1–19.