

С. Т. Барась

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ
ПОБУДОВИ
ГІДРОАКУСТИЧНИХ
ДОПЛЕРІВСЬКИХ ЛАГІВ



Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/422>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Т. Барась

**ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ
ПОБУДОВИ
ГІДРОАКУСТИЧНИХ
ДОПЛЕРІВСЬКИХ ЛАГІВ**

Монографія

УНІВЕРСУМ – Вінниця
2008

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/422>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 681.883.482
Б 24

Рецензенти:

А. І. Гончар, доктор технічних наук, член-кореспондент НАНУ

М. А. Філінюк, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 27.03.2008 р.)

Барась С. Т.

Б 24 Прикладні аспекти побудови гідроакустичних доплерівських лагів: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 241 с.

ISBN 978-966-641-257-0

В монографії обґрунтовується нова концепція створення гідроакустичних доплерівських лагів. Вона базується на теоретично та експериментально доведеній високій потенційній точності вимірювання доплерівських зсувів частоти при імпульсному випромінюванні. Розроблені математичні моделі похибок вимірювання горизонтальних та вертикальної складових вектора швидкості судна, проаналізовано вплив різних джерел похибок на результуючу похибку в різних умовах плавання. Наведено діючі алгоритми роботи доплерівського лага у різних режимах експлуатації.

Монографія розрахована на спеціалістів у галузі гідроакустики, зокрема, розробників доплерівських лагів, аспірантів та студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

УДК 681.883.482

ISBN 978-966-641-257-0

© С. Барась, 2008

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Передмова	6
Вступ	8
1 Узагальнена структура гідроакустичних доплерівських лагів та вихідні математичні залежності	13
1.1 Принцип дії та аналіз структури доплерівського лага	13
1.2 Аналіз класичних підходів до побудови доплерівських лагів	19
1.3 Вихідні математичні співвідношення	28
1.4 Огляд проблематики	36
Висновки	38
2 Структура доплерівського сигналу	40
2.1 Вимірювання несучої частоти імпульсного радіосигналу	40
2.1.1 Оцінка похибки методу підрахунку «нулів»	41
2.1.2 Вплив перехідних процесів у смуговому фільтрі	47
2.2 Формування структури доплерівського ехосигналу	57
2.2.1 Формування високочастотного заповнення	58
2.2.2 Спектр обвідної доплерівського ехосигналу	66
2.3 Обґрунтування математичної моделі донного доплерівського ехосигналу	71
2.4 Структура сигналу об'ємної реверберації	75
2.5 Експериментальні дослідження флуктуацій частоти доплерівського ехосигналу	79
2.5.1 Методика експериментальних досліджень	79
2.5.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень	85
Висновки	93
3 Аналіз похибок вимірювання складових вектора швидкості	96
3.1 Математичні моделі похибок вимірювання горизонтальної та вертикальної складових вектора швидкості	97
3.2 Оцінка похибок вимірювання складових вектора швидкості	105
3.3 Усереднена швидкість та похибки її визначення	125
3.4 Оптимізація часової діаграми роботи лага	131
Висновки	140
4 Підвищення точності вимірювання швидкості в різних умовах плавання	141
4.1 Робота лага з донними сигналами	142
4.2 Робота лага з сигналами об'ємної реверберації	148
4.3 Робота лага в умовах глибокого моря	154

4.3.1	Обґрунтування алгоритму роботи.....	155
4.3.2	Аналіз похибок вимірювання.....	159
4.4	Особливості функціонування лага в умовах швартування судна	164
	Висновки.....	170
5	Алгоритми функціонування доплерівських лагів.....	173
5.1	Алгоритм функціонування лага для широкого класу суден.....	173
5.1.1	Алгоритм пошуку донного сигналу.....	176
5.1.2	Алгоритм пошуку сигналів об'ємної реверберації..	181
5.1.3	Алгоритм роботи лага на міліні.....	185
5.1.4	Алгоритм роботи лага з донним сигналом в умовах глибокого моря.....	189
5.1.5	Алгоритм роботи з сигналами об'ємної реверберації.....	192
5.1.6	Алгоритм роботи при вимірюванні параметрів течій.....	193
5.1.7	Алгоритми роботи у перехідних режимах	195
5.2	Алгоритм функціонування доплерівського лага з бічастотною структурою.....	197
5.2.1	Алгоритм пошуку ехосигналів.....	197
5.2.2	Алгоритм роботи.....	204
5.3	Додаткові алгоритми обробки інформації	205
	Висновки.....	210
	Післямова.....	212
	Додаток А. Зменшення систематичної похибки вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості носія доплерівським лагом.....	214
	Додаток Б. Щільність розподілу значень частоти у парціальних імпульсах доплерівського сигналу (експериментальні дані).....	224
	Додаток В. Осцилограми реальних доплерівських сигналів на виході частотно-вибірної системи приймального тракту доплерівського лага.....	229
	Додаток Г. Основні положення алгоритму визначення калібровочних коефіцієнтів лага в натурних умовах.....	232
	Література.....	236

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРП – автоматичне регулювання підсилення
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ВЧ-канал – високочастотний канал
ДР – діаграма роботи
НВ – найвіддаленіший ефективний шар
НЧ-канал – низькочастотний канал
СДР – сигнал донної реверберації
СОР – сигнал об'ємної реверберації
ХС – характеристика спрямованості
ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій
ШОВ – широка смуга – обмеження – вузька смуга

ПЕРЕДМОВА

Немало часу минуло з тих пір, коли надзвичайно амбіційний і творчий колектив молодих інженерів і техніків почав працювати над створенням уніфікованого ряду гідроакустичних доплерівських лагів для широкого класу кораблів та суден Військово-Морського Флоту, Міністерства Морського Флоту, Міністерства рибного господарства, річкового флоту тощо. Це були часи існування Радянського Союзу. Комплексна науково-дослідна лабораторія, перед якою постало це завдання, була структурною одиницею науково-дослідного інституту «Риф», що функціонував у складі виробничого об'єднання на території сьогодишньої Молдови.

В лабораторії працювали випускники всесвітньо відомих вищих навчальних закладів: Київського політехнічного інституту, Львівського політехнічного інституту, Одеського політехнічного інституту та Одеського державного університету, Таганрогського радіотехнічного інституту, а також випускники технічних вузів Ленінграда (Санкт-Петербурга), Кишинєва, Тбілісі тощо. Висока спільна мета об'єднала цих людей в працездатний та високопрофесійний колектив для створення таких навігаційних приладів (гідроакустичних лагів), які б не тільки задовольняли всі вимоги тактико-технічного завдання, але й були на рівні або випереджали кращі світові зразки.

Це був час, коли всі прогресивно налаштовані розробники нової техніки зрозуміли суттєві переваги переходу від застосування пристроїв жорсткої логіки до програмованих пристроїв. З огляду на вимірювальний прилад, який необхідно було створити, такий підхід був особливо привабливим. Пояснюється це тим, що гідроакустичні доплерівські лаги встановлюються на носіях, які з одного боку постійно перебувають під впливом динамічних зміщень (хитавиця, вертикальні зміщення, виляння тощо), а з іншого – має місце просторово-часова несталість характеристик акваторії (глибина, параметри ґрунту, характеристики дна). Було зрозуміло, що надійна робота лага в таких умовах плавання не може бути забезпечена нічим іншим, крім створених спеціальних адаптивних алгоритмів. Для цього потрібно було використовувати програмовані пристрої, а також мати достатній експериментальний матеріал за результатами широкомасштабних досліджень сигналів та процесів в реальних умовах плавання.

Ні мальовничі краєвиди Південного берега Криму, ні жорстокі шторми не стали на перешкоді накопичення у великих обсягах безцінної та різнобічної інформації про структуру доплерівських

сигналів та залежність їх енергетичних параметрів від умов плавання. Дослідження, які проводились у Чорному морі на гідрографічних суднах Головного управління навігації та океанографії СРСР, дали багато експериментального матеріалу, який став основою для створення адаптивних алгоритмів. Пізніше були випробовування доплерівських лагів на Азовському морі, морях басейну Північного Льодовитого океану, Японському, Південно-Китайському, Середземному та Балтійському морях, Тихому, Індійському та Атлантичному океанах, але вони лише давали додаткові дані для покращення та удосконалення алгоритмів.

В монографії викладено матеріал, який є узагальненням нових підходів до створення гідроакустичних доплерівських лагів. Важливо підкреслити, що всі теоретичні дослідження та висновки базуються або підтверджені експериментально, оскільки вони були впроваджені в нових розробках і перевірені в реальних умовах експлуатації.

ВСТУП

Гідроакустичні лаги [1–3] – це судові навігаційні прилади, які призначені для визначення повної абсолютної швидкості судна. Термін “абсолютна швидкість” застосовується для позначення швидкості об’єкта відносно дна, тоді як термін “відносна швидкість” чисельно характеризує швидкість носія відносно певних шарів води. Вимірювання лагом **повної** швидкості передбачає певну етапність, а саме: вимірювання спочатку поздовжньої та поперечної складових вектора повної швидкості, а потім визначення повної (результуючої) швидкості.

Залежно від функціонального призначення гідроакустичні лаги поділяють на навігаційні, швартовні та комбіновані або універсальні. Навігаційні лаги забезпечують неперервне вимірювання швидкості судна та обчислення на її основі пройденого шляху. Швартовні лаги виконують функцію вимірювання невеликих за абсолютним значенням поздовжньої та поперечної складових швидкості судна в районах з невеликими глибинами. Крім цього швартовні лаги, які встановлюються на глибоководних жилих або нежилих апаратах, використовуються також для вимірювання вертикальної складової швидкості при наближенні цих апаратів до дна. Слід зазначити, що виконання судном чи глибоководним апаратом швартовних операцій робить умови функціонування лага надто специфічними, що не може не вплинути на його алгоритм роботи, побудову та технічні характеристики. Універсальні лаги забезпечують вирішення будь-якої з вище перерахованих задач.

За способом використання сигналу гідроакустичні лаги поділяють на доплерівські та кореляційні. В доплерівських лагах інформаційним параметром є частота заповнення прийнятого антенною системою сигналу, а в кореляційних – ступінь (коефіцієнт) кореляції між випроміненим та відбитим дном сигналами, причому коефіцієнт кореляції є функцією швидкості носія.

Кореляційні лаги до сьогоднішнього дня не отримали широкого застосування, хоча науково-дослідні роботи у цьому напрямку в ряді країн ведуться (Швеція, США, Російська Федерація). Очевидно, майбутнє покаже, який з цих двох типів лагів (доплерівські чи кореляційні) затвердиться на ринку навігаційних приладів як вимірювач з потенційно привабливішими тактико-технічними характеристиками. Але, враховуючи наробки з доплерівських лагів, їх широке поширення в наш час, незаперечно більшу універсальність цих приладів, можна спрогнозувати, що саме доплерівські лаги будуть і в подальшому основним засобом вимірювання абсолютної швидкості

суден. Саме тому об'єктом дослідження в монографії є **гідроакустичний доплерівський лаг**.

Ефект Доплера відомий давно [4], але його використання в гідроакустиці, де мають місце складні та неоднозначні процеси поширення ультразвукового сигналу у водяному середовищі і ще більш неоднозначні процеси формування ехосигналу дном акваторій, тривалий час вважалось проблематичним. Складна динаміка руху носія в реальних умовах плавання разом зі складними процесами поширення та формування сигналу, а також його попередньою обробкою суттєво деформують структуру сигналу, роблячи його відмінним від випроміненого як за зовнішнім виглядом, так і за внутрішнім заповненням. Тому у доплерівських системах, у яких інформаційним параметром є частота, важливо створити умови, за яких буде забезпечена можливість точного вимірювання доплерівських зсувів. Це означає, що потрібно не тільки мати хороші пристрої та методи вимірювань частоти, але й подбати про максимально можливе «очищення» ехосигналу, що подається на остаточну процедуру вимірювання.

Забезпечення найефективніших умов для процедури вимірювання частоти передбачає постійний супровід сигналу, розсіяного дном або об'ємними розсіювачами. Сюди слід віднести потрібну просторову орієнтацію характеристик спрямованості приймально-передавальних антен лага в умовах хитаючи, а також постійне слідкування за часом поширення сигналу у водному середовищі, тобто за глибиною, з якої приходить сигнал. Підкреслимо, що постійний супровід ехосигналу – це необхідна умова не тільки для надійної роботи лага, а й для отримання необхідної точності вимірювання складових вектора швидкості носія. Отже, обчислювальному пристрою лага необхідно надати адаптивний алгоритм, який би відповідав за формування потрібної часової діаграми роботи лага та забезпечував всі необхідні розрахунки та статистичну обробку в реальному масштабі часу. Крім цього, намагання забезпечити найоптимальніші умови для роботи вимірювачів частоти не можуть бути реалізовані без оптимізації енергетичного потенціалу лага відповідно до рівня ехосигналу (співвідношення сигнал/шум). Очевидно, це питання є також складовою частиною адаптивного алгоритму роботи лага.

Адаптивний супровід ехосигналу лага за його рівнем передбачає збереження середнього значення рівня на вході вимірювача частоти таким, щоб була реалізована потенційна точність вимірювача частоти. Чи може бути беззаперечно виконана ця вимога? Очевидно, ні. Справа тут у тих же причинах, які взагалі впливають на процеси формування

ехосигналу. Закон розподілу середніх рівнів ехосигналів описується приблизно релеєвським законом [5], тому в часі ці рівні змінюються від нульових значень до максимальних. Враховуючи невисоку просторово-часову кореляцію, ця зміна рівня може відбутися у сусідніх циклах (або на достатньо короткому проміжку часу). Отже, якщо відмовитися від примусового зовнішнього впливу на роботу вузлів лага під час обробки ехосигналу, слід очікувати надходження на вхід вимірювача частоти і достатньо слабких і достатньо потужних сигналів. Щодо оптимізації енергетичного потенціалу лага відповідно до рівня ехосигналу, то розв'язання цієї проблеми з урахуванням вищенаведених міркувань полягає у слідуванні за **середнім** значенням рівня, який повинен визначатися за певним алгоритмом, причому це середнє значення повинно використовуватися для керування потужністю випроміненого сигналу та чутливістю приймально-підсилювального пристрою.

Вищенаведені сентенції достатньо прозоро орієнтують читача (фахівця) на побудову такого алгоритму роботи лага, який би дозволяв забезпечити повне невтручання оператора в роботу приладу після подачі на нього живлення. Це означає, що навіть за умов відсутності інформації про глибину під кілем доплерівський лаг повинен бути здатний самостійно налаштуватися на роботу з донним сигналом (сформувати необхідну для цього часову діаграму), автоматично підібрати оптимальні значення потужності випромінених сигналів та чутливості приймально-підсилювального пристрою. Будемо говорити надалі, що лаг повинен забезпечити надійний пошук і виявлення ехосигналу, визначивши при цьому всі необхідні дані для встановлення потрібних параметрів алгоритму супроводу.

Очевидно, що не в усіх районах Світового океану доплерівський лаг здатний працювати з донним сигналом, тобто у режимі визначення складових абсолютної швидкості. Це залежить, зрозуміло, у першу чергу від енергетичного потенціалу лага (потужність передавача, робоча частота, чутливість приймального тракту), а також від алгоритму супроводу ехосигналу (на великих глибинах час поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку виявляється сумірний з періодом хитавиці, що вимагає окремо подбати задля надійного супроводу про потрібну просторову орієнтацію характеристик спрямованості приймально-передавальних антен). За таких умов доцільно перейти на роботу по сигналах об'ємної реверберації і вимірювати складові відносної швидкості, відшукавши найвіддаленіший від поверхні акваторії ефективний шар об'ємних розсіювачів. Таким чином, доплерівський лаг повинен бути додатково «озброєний» алгоритмом пошуку сигналу об'ємної реверберації та

алгоритмом автоматичного переходу з режиму вимірювання абсолютної швидкості на режим вимірювання відносної швидкості і навпаки. Якщо дозволяє енергетичний потенціал лага працювати з донним сигналом, то така можливість повинна бути алгоритмічно забезпечена, якщо – ні, то повинна бути забезпечена можливість роботи з сигналом об'ємної реверберації з постійним контролем можливості автоматичного переходу на роботу по дну.

У більшості випадків результати вимірювання лагом складових вектора швидкості повинні використовуватися командиром (штурманом) безпосередньо у процесі цих вимірювань, тобто в реальному часі. Іншими словами, повинна відбуватися певна вторинна обробка доплерівських зсувів з наступним виведенням результатів цієї обробки на індикатор. Не завжди логічно з цієї точки зору відмовлятися від участі оператора. Мова йде про різні підходи до використання інформації про складові швидкості в режимі, наприклад, швартування [6] і у відкритому морі, а це фактично неможливо закласти програмно. Різні режими плавання в загальному випадку вимагають різних режимів індикації. Режим індикації – це встановлення певного часу осереднення та певного темпу оновлення інформації. Справа у тому, що вимірювання складових швидкості відбувається в кожному циклі випромінювання–прийому, а тривалість циклу залежить від глибини і може становити від десятка до кількох сотень мілісекунд. Індикація з таким часом оновлення інформації, зрозуміло, недоречна, тому що такий темп оновлення не корелюється з можливостями людського ока. Крім цього, слід пам'ятати про значну інерційність на воді, тобто про неможливість швидкої зміни значень складових швидкості. Саме тому встановлюють мінімальний час оновлення інформації на індикаторі (прийнято 2 с) і при цьому забезпечують такий же часовий інтервал осереднення у процесі вторинної обробки. У відкритому морі кращим без сумніву є збільшення часу осереднення, але темп оновлення на індикаторі може бути залишений незмінним – (2 с).

Найважливішим параметром лага вважається, зрозуміло, похибка вимірювання складових вектора швидкості. Як і будь-яка похибка, вона складається з випадкової та систематичної складових. Зменшення випадкової складової пов'язується в першу чергу з оптимізацією процедури вимірювання частоти, а зменшення систематичної складової залежить від багатьох факторів. Зменшення систематичної складової похибки можливе, якщо встановлені відповідні математичні залежності, якщо існують відповідні первинні перетворювачі, що вимірюють і в потрібному вигляді формують дестабілізуючі параметри (в першу чергу це стосується кутів

хитавиці), і якщо обчислювальний пристрій лага здатний вносити необхідні поправки на дестабілізуючі фактори в реальному масштабі часу. Отже, досягнення мінімальних значень похибок вимірювання складових вектора швидкості носія ми будемо пов'язувати з мінімізацією випадкової складової та з введенням поправок на дестабілізуючі фактори (якщо їх параметри вимірюються зовнішніми по відношенню до лагу пристроями).

Перед викладенням основного матеріалу варто зазначити, що його цінність полягає у тому, що всі теоретичні міркування і підходи до розв'язання тих чи інших проблем тісно переплетені з їх обов'язковою експериментальною перевіркою і у більшості випадків з практичною реалізацією. Більше того, підтвердження основних висновків здійснювалось як в лабораторних, так і в натурних умовах.

1 УЗАГАЛЬНЕНА СТРУКТУРА ГІДРОАКУСТИЧНИХ ДОПЛЕРІВСЬКИХ ЛАГІВ ТА ВИХІДНІ МАТЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ

1.1 Принцип дії та аналіз структури доплерівського лага

Об'єктом дослідження у цій роботі є гідроакустичний доплерівський лаг – вимірювач швидкості надводних кораблів і суден та підводних човнів або глибоководних апаратів. Доплерівський лаг – це активний гідроакустичний прилад, робота якого базується на випромінюванні під певним кутом в бік дна акустичної енергії, прийому частини розсіяного дном сигналу і визначенні значення доплерівського зміщення частоти, яке однозначно пов'язане зі швидкістю носія.

Доплерівські лаги, які знаходяться в експлуатації, відрізняються між собою тактико-технічними характеристиками, дизайном, методами та засобами представлення інформації, функціональними можливостями, методами та пристроями первинної та вторинної обробки інформації тощо. Не дивлячись на такі розбіжності, між різними модифікаціями лагів є багато спільного. Це спільне відображає однаковий принцип роботи. В зв'язку з цим можна побудувати узагальнену структурну схему гідроакустичного доплерівського лага, яка повинна складатися лише з функціонально необхідних структурних одиниць. Така схема наведена на рис. 1.1. Зауважимо, що на схемі окремо показані вузли, блоки, прилади, які відносяться до тракту вимірювання поздовжньої складової швидкості, а також аналогічні структурні компоненти, які відносяться до тракту вимірювання поперечної складової швидкості.

На рис. 1.1 використані такі позначення:

1А, 1Б – приймально-випромінювальні гідроакустичні антени; 2 – генератор; 3, 4 – комутатори “прийом-передача”; 5, 6 – вхідні кола приймально-підсилювальних пристроїв; 7, 8, 9, 10 – підсилювачі прийнятих антенами вхідних сигналів відповідно по першому, третьому, другому та четвертому променях; 11, 12, 13, 14 – амплітудні селектори сигналів відповідно першого, третього, другого та четвертого променів; 15, 16, 17, 18 – вимірювачі частоти заповнення сигналів відповідних променів; 19 – цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП); 20 – індикатор складових вектора швидкості V_x , V_y ; 21 – індикатор складових пройденого шляху S_x , S_y ; 22 – індикатор інших параметрів руху судна.

Аналіз роботи наведеної схеми лага будемо виконувати з одночасним аналізом існуючих підходів до побудови окремих його

функціональних компонентів. Почнемо з гідроакустичних антен. В [1,3] аргументовано доводиться, що реально забезпечити необхідну точність вимірювання складових вектора швидкості можна лише за умови використання двопробневих систем. Це означає, зокрема, що для вимірювання поздовжньої складової вектора швидкості необхідно випромінювання і прийом акустичних сигналів здійснювати в межах двох променів, які лежать в діаметральній площині судна і є симетричними відносно вертикалі (система Янус). У цьому випадку сумарне доплерівське зміщення (різниця доплерівських частот сигналів, прийнятих по двох протилежних променях) пов'язане зі швидкістю судна таким лінійним співвідношенням:

$$F_{\partial} = \frac{4 \cdot V_x}{c} f_0 \cos \alpha_0, \quad (1.1)$$

де c – швидкість звуку в зоні розташування гідроакустичних антен; V_x – поздовжня складова вектора швидкості судна; f_0 – робоча частота (несуча частота сигналу, що надходить на випромінювання); α_0 – кут нахилу променя характеристики спрямованості (ХС) антени відносно горизонту.

Слід зазначити, що співвідношення (1.1) отримане з точного виразу для частот вхідних сигналів, прийнятих по обох променях, шляхом розкладу в ряди та нехтуванням нелінійними членами. Похибка, що при цьому виникає, як справедливо зазначається в [3], нехтовно мала, правда, за умови відсутності хитавиці.

З виразу (1.1) видно, що для визначення швидкості V_x необхідно знати не тільки виміряне значення доплерівського зміщення F_{∂} , але й інші величини, зокрема, швидкість звуку c . Існують такі модифікації лагів, в яких структурою передбачено канал неперервного введення поточної інформації про швидкість звуку. Очевидно, у цьому випадку передбачається наявність на борту відповідних засобів для її вимірювання. Інший підхід передбачає ускладнення конструкції гідроакустичних антен і створення так званих незалежних щодо доплерівського зміщення антен. Принцип їх дії базується на тому, що при локальній зміні швидкості звуку в зоні розташування антен відбувається автоматична зміна кута нахилу променя ХС таким чином, що відношення $\cos \alpha_0 / c$ залишається постійним, тобто доплерівське зміщення частоти згідно з формулою (1.1) визначається лише значенням швидкості носія і, звичайно, залежить від робочої частоти лага.

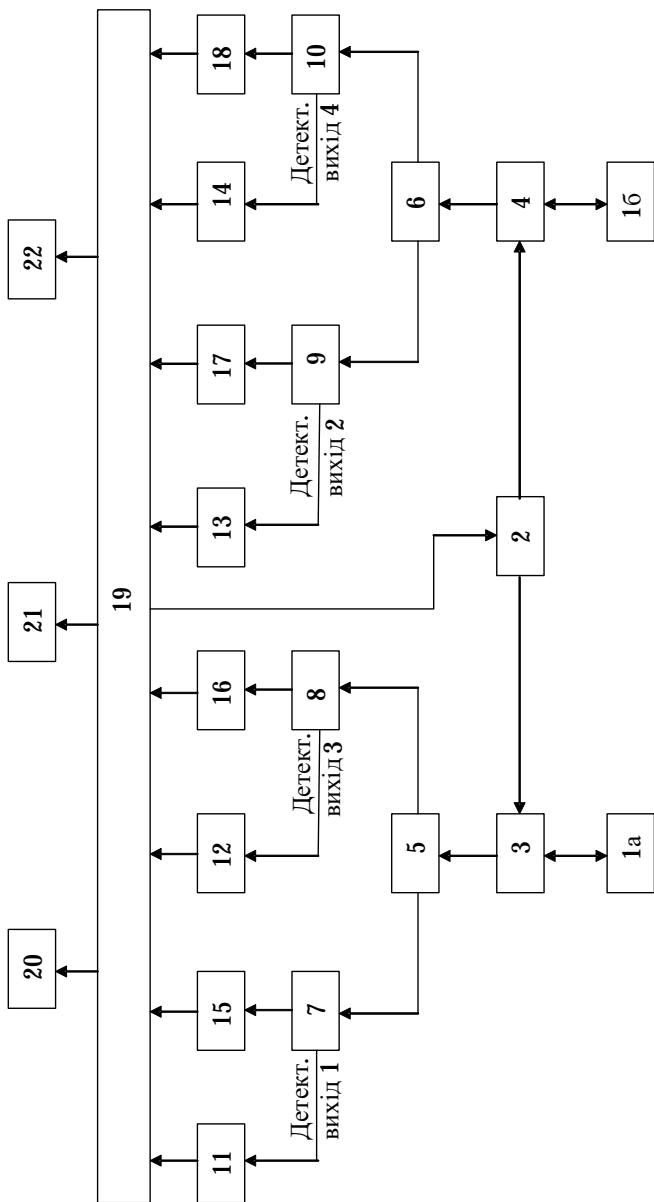


Рис. 1.1 – Узагальнена структурна схема гідроакустичного доплерівського лага

Таким чином, повертаючись до структурної схеми, рис. 1.1, зазначимо, що для вимірювання обох складових вектора швидкості судна необхідно використовувати в загальному випадку дві антени, одна з яких створює янусну ХС в діаметральній площині носія, інша – в траверзній.

Взагалі просторова орієнтація променів ХС відносно діаметральної площини носія може бути іншою, як і іншою може бути кількість самих променів. Для визначеності зазначимо, що в цій роботі розглядається діаметально-траверзне розташування променів, причому їх кількість дорівнює чотирьом. Нумерація променів відповідає прийнятій в [1,3]: 1 – носовий промінь, 2 – промінь правого борту, 3 – кормовий промінь, 4 – промінь лівого борту. Оскільки прийняті гідроакустичними антенами сигнали розділяються, підсилюються, фільтруються та обробляються як окремі сигнали з ознакою причетності до певного променя, то пристрої, які беруть участь у вказаних операціях, будемо називати пристроями відповідного променя.

Після розсіювання дном сигнали по обох променях повертаються на одну і ту ж робочу поверхню антени і на її виході формується єдиний (результуючий) сумарний сигнал. Для подальшої обробки, очевидно, цей сигнал повинен бути розділений на окремі (незалежні) сигнали кожного променя. Спеціальне з'єднання п'єзокерамічних елементів антени з одного боку і певне фазування гетеродинної напруги, що подається на змішувач для перетворення спектра, – з іншого дозволяють це зробити. Отже, після проходження вхідних кіл 5 і 6 вже існують окремі сигнали всіх чотирьох променів: перший і третій – на виході вхідного кола 5; другий і четвертий – на виході вхідного кола 6.

Як видно із структурної схеми, далі всі сигнали незалежно один від одного підсилюються і детектуються. Зазначимо, що підсилення сигналів у кожному каналі встановлюється індивідуально з урахуванням реальної амплітуди сигналу. Ця процедура повинна відповідати вимозі адаптивності. Сигнали на несучих частотах несуть інформацію про доплерівські зміщення, тому вони надходять на вимірювачі частоти 15, 16, 17, 18 і далі – на цифровий обчислювальний пристрій 19, а продетектовані сигнали – на амплітудні селектори 11, 12, 13 і 14 для формування часової діаграми роботи лага. В ЦОП лага інформація про доплерівські зміщення обробляється, виконуються необхідні розрахунки та перетворення, після чого отримані результати у зручному вигляді надходять на індикацію.

Звичайно, основним і визначальним функціональним призначенням лага є вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості судна в корабельній системі координат. Але при цьому можливості лага, як активного гідроакустичного засобу, використовуються не в повному обсязі. Тому сучасні лаги мають розширені функціональні можливості, частина з яких вже знайшла своє втілення (визначення складових пройденого шляху та результуючий шлях, кутів зносу (дрейфу) судна, глибини моря і горизонтальних відстаней до ділянок дна, де визначається глибина), а частина буде запропонована в цій роботі при описі алгоритму роботи лага у разі використання двочастотного режиму (визначення векторів течій – модуля і напрямку – на різних горизонтах) та традиційних режимів (вертикальної складової швидкості, статичних кутів крену та диференту). До речі, оперативне визначення кутів крену та диференту судна має не тільки особливе значення з точки зору безпеки плавання, але й може бути використане власне лагом для внесення поправок з метою досягнення більшої точності визначення складових швидкості.

Узагальнена схема, рис. 1.1, передбачає використання одного значення робочої частоти, тобто схема відображає побудову одночастотного лага. Зрозуміло, що конкретні значення робочих частот для різних модифікацій лагів можуть бути різними, як різними є і їх енергетичні потенціали. І робоча частота, і енергетичний потенціал лага визначаються його призначенням, зокрема, залежать від діапазона робочих глибин, в межах якого лагом вимірюється абсолютна швидкість судна. Впливають на конкретні значення цих параметрів і низка інших факторів. Але перед лагом може стояти завдання вимірювання складових абсолютної швидкості в такому широкому діапазоні глибин, для якого неможливо використати одне значення робочої частоти. Тому складніші доплерівські лаги характеризуються наявністю двох каналів, кожен з яких працює на “своїй” частоті, – високочастотного і низькочастотного.

Відомо, що в зоні континентального шельфу, де глибини незначні, використовується високочастотний канал, а при більших глибинах – низькочастотний. Для значних глибин з урахуванням невеликої швидкості поширення звуку розсіяний дном сигнал потрапляє на приймальну антену з достатньо великою затримкою (одиниці секунд при кілометрових глибинах). Отже, традиційне використання низькочастотного каналу не дозволяє отримати поточне значення швидкості, що для певних випадків є неприпустимим. Саме тому логічним розв'язанням цієї проблеми було б спільне використання високочастотного та низькочастотного каналів, враховуючи те, що низькочастотний канал може працювати по дну, а

високочастотний – забезпечити вимірювання складових швидкості в реальному масштабі часу. Отже, одночасна спільна робота обох каналів могла б забезпечити вимірювання поточних значень складових вектора абсолютної швидкості в усьому діапазоні робочих глибин. Очевидно, структура лага, рис. 1.1, не відповідає двочастотному (двоканальному) лагу. Детальніше про таку модель лага, про алгоритм його роботи та відповідне математичне забезпечення буде говоритись у наступних розділах.

Відмітимо ще деякі особливості роботи лагів. Просторове положення променів ХС залежить не тільки від параметрів апаратури, конструкції та особливостей розташування на носії гідроакустичних антен, але й від кутів хитавиці судна в реальних умовах плавання. В той же час, як вже зазначалось, основною задачею лага є вимірювання саме горизонтальних складових вектора швидкості. Отже, потрібна безперервна інформація про динаміку носія для визначення складових вектора швидкості, отриманих як проекції на горизонтальні осі корабельної системи координат. В подальшому будемо виходити з того, що інформація про поточні значення кутів хитавиці судна надходить від деяких зовнішніх по відношенню до лага датчиків хитавиці з відомою похибкою. Мова, очевидно, йде про такі судна і таке використання лагів, де це важливо. Якщо відповідні датчики відсутні, то поправка на хитавицю не вводиться, але при роботі лага по алгоритму визначення статичних крену і диференту, про що вже зазначалось, можуть вводитися саме ці поправки.

Для однозначності розуміння зазначимо, що горизонтальні складові вектора швидкості носія, які визначаються лагом і використовуються для цілей навігації, пов'язані з корабельною системою координат таким чином: проекція поздовжньої складової V_x спрямована вперед (додатне значення) або назад (від'ємне значення) і збігається з діаметральною площиною носія, проекція поперечної складової V_y спрямована вправо (додатне значення) або вліво (від'ємне значення) і лежить в траверзній площині носія, вертикальна складова V_z спрямована вертикально вниз або вверх (відповідно додатне або від'ємне значення).

Суттєвий вплив на структуру лага має прийнята система керування режимами його роботи в процесі експлуатації. Необхідність постійної уваги оператора і оперативне примусове внесення відповідних змін в роботу залежно від глибини, встановлення відповідної до динаміки руху носія або інших чинників тривалості інтервалу осереднення (визначення середнього значення з певної сукупності вимірювань), оперативна зміна оператором потужності зондуючого сигналу, інші втручання персоналу в роботу лага – це

вчорашній день приладів навігаційної техніки. Сучасні навігаційні прилади і гідроакустичні доплерівські лаги, зокрема, повинні бути фактично адаптивними системами. В роботі наводяться розроблені спеціальні алгоритми та відповідні технічні рішення, які забезпечують стійке функціонування лага в різних умовах експлуатації, в тому числі і в режимі швартування судна, без участі оператора. Значна частина таких технічних рішень захищена на рівні винаходів [7–12].

Найбільший вплив на концепцію побудови лага мають результати досліджень особливостей формування розсіяного дном сигналу і пов'язаної з цим структури засобів точного вимірювання частоти доплерівського зміщення, а також алгоритми відповідних обчислень. Структура і характеристики розсіяного дном сигналу впливають на вибір енергетики лага, його часову діаграму роботи, методи і засоби вимірювання частоти та на забезпечення стійкої роботи в умовах дії дестабілізуючих факторів. Всі перераховані чинники визначають в цілому тактико-технічні характеристики лага. Детальний їх аналіз і дозволяє оптимізувати структуру доплерівського лага.

1.2 Аналіз класичних підходів до побудови доплерівських лагів

Найповніше концепція побудови гідроакустичних доплерівських лагів викладена в працях [1–3]. Важливо зазначити, що в роботі [1] виконано аналіз потенційної точності вимірювання швидкості абсолютними лагами, який базується фактично на прийнятій концепції їх побудови, сформульовано рекомендації щодо їх структури та методів отримання корисної інформації. Виконання цих рекомендацій, на думку автора, максимально наблизить основні тактико-технічні характеристики лагів до їх потенційних значень.

Вказані вище та низка інших праць, наприклад [13], акумулювали в собі ті підходи, які склалися на той час в галузі проектування доплерівських лагів. Ці підходи базувалися на певному розумінні структури доплерівського сигналу, потенційної точності вимірювання доплерівських зміщень частоти та методів боротьби з дестабілізуючими факторами. Слід зазначити, що трактування деяких аспектів цієї проблеми було помилковим в стратегічному плані. На підтвердження цього достатньо сказати, що **реальна** (експериментально підтверджена) точність вимірювання складових вектора швидкості виявилась суттєво **вищою** наведеної в цих працях **потенційної точності**. Зрозуміло, що потенційна точність була визначена неправильно. Наслідком значно заниженої потенційної

точності могли б бути невтішні перспективи зі створення високо-точних абсолютних лагів, які до того ж повинні функціонувати в складних реальних умовах плавання.

Окремо зазначимо, що існуючі підходи практично блокували подальший прогрес у створенні абсолютних лагів для їх експлуатації на сучасних підводних човнах. Справа у тому, що для таких об'єктів дуже важливою з військової точки зору є забезпечення вимоги скритності. Ця вимога забезпечується мінімізацією шумових характеристик човна. Це означає, що робота всього обладнання човна, в тому числі і активних гідроакустичних засобів, до яких належить і гідроакустичний лаг, не повинна демаскувати його. Існуючі підходи не давали бажаного результату.

Розглянемо ще один аспект роботи доплерівського лага, пов'язаний з його роботою на граничних глибинах, наприклад, **6000** м. Мова йде про робочу глибину лага, тобто глибину під кілем судна, на якому встановлений лаг. Зазначимо, що лише незначний відсоток Світового океану має більші за **6000** м глибини, тому глибоководні активні навігаційні системи, як правило, розраховують саме на таку граничну глибину.

При куті нахилу променя ХС відносно горизонту біля **70⁰** (приблизно таке його значення вибирається з енергетичних міркувань [1]) час поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку складає близько десяти секунд. Відомо, що доплерівський зсув частоти в сигналі створюється на інтервалах часу, протягом яких відбуваються дві процедури – випромінювання зондуючого сигналу і прийом розсіяного дном сигналу. Протягом цих інтервалів часу сигнал “знаходиться” на гідроакустичній антені, яка пересувається разом з носієм. Отже, виміряна в таких умовах швидкість є деякою середньою швидкістю за інтервали часу випромінювання і прийому, причому отриманою з затримкою в десять секунд після початку випромінювання. Підбити підсумки наведених вище міркувань можна такою фразою: швидкість носія вимірюється лише тоді, коли створюється доплерівський зсув, а протягом того часу, коли сигнал поширюється в середовищі (воді), вимірювання не відбувається, тобто всі коливання швидкості судна на цьому інтервалі не відображаються на доплерівських зміщеннях частоти і ці коливання швидкості не фіксуються.

В [14] виконано аналіз можливих похибок вимірювання, пов'язаних з несталістю швидкості носія на інтервалі часу, що дорівнює тривалості поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку. Саме в цій статті та дослідженнях автора вперше звертається увага на це питання і пропонуються шляхи його

Наукове видання

Барась Святослав Тадіонович

**ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ
ГІДРОАКУСТИЧНИХ ДОПЛЕРІВСЬКИХ ЛАГІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено автором

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 07.07.2008 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. др. арк. 13,92
Наклад 100 прим. Зам № 2008-099

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-81-59

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/422>

Видавництво Вінницького національного технічного університету
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>