

УДК 681.883.45

К.Г. Кебкал

*Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», Севастополь*

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ГІДРОАКУСТИЧНОГО (БЕЗДРОТОВОГО) ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗАВДАНЬ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Наведені основні результати фізичних експериментів прототипу системи цифрового гідроакустичного зв'язку, яка реалізує метод монотонного розширення спектру сигналу. Система показала здатність забезпечувати якісний прийом цифрової інформації в складних динамічних багатопроменевих каналах. Порівняно з традиційними системами, застосування несучої з монотонним розширенням спектру дало змогу більш ніж вдвічі збільшити коефіцієнт частотної ефективності, забезпечуючи суттєве підвищення досяжної швидкості передавання даних.*

**Ключові слова:** підводна телеметрія, цифровий зв'язок, бездротовий підводний зв'язок, гідроакустичний зв'язок.

### Вступ

Під час поширення у водному середовищі звукові хвилі можуть відбиватися або відхилятися від поверхні води, рельєфу дна, різних предметів, а також від шаруватих неоднорідностей передавального каналу. Такі умови поширення визначають структуру прийнятого сигналу, що містить собою не єдиний імпульс, а цілу групу зрушених у часі імпульсів різного рівня потужності [1, 2].

Цей ефект затрудняє чи навіть унеможливає інформаційний обмін. Тривала багатопроменева реверберація визиває «міжсимвольну інтерференцію» чи «міжсимвольну взаємодію», при цьому поточний цифровий символ зазнає значних завад [3]. Подальші складності визначаються також тим, що залежно від хвилювання морської поверхні, профілю дна, течій, ступеня перемішаності водних шарів, обсягу планктону і/чи повітряних крапель у воді, геометричні і щільнісні відносини в передавальному каналі постійно змінюються. З цієї причини, а також при переміщеннях приймача і передавача виникає додаткове, а саме частотне, розсіювання сигналу – доплерівська реверберація [4, 5].

Згідно з дослідженнями [6, 7] ревербераційна луна може бути ослаблена, якщо несуча передавальний сигнал характеризується безупинною зміною частоти (сигнал зазнає безперервного монотонного розширення спектру). Оскільки акустичні хвилі поширюються порівняно повільно, використання не-

сучих з таким розширенням спектру надає суттєву перевагу: кожен багатопроменевий компонент надходить в приймач зі своєю власною миттєвою частотою. Через такий розділ за частотами багатопроменеві компоненти можуть бути відокремлені один від одного традиційним шляхом у частотній області.

Внаслідок використання такого підходу багатопроменеві компоненти прийнятого сигналу після розповсюдження по каналу розділяються на власне корисний сигнал і ревербераційні завади. При цьому ревербераційні завади відстають за частотою від корисного сигналу, що дає можливість повністю або частково усувати їх під час приймання.

Аналогічно, в роботах [6, 7] показано, що вплив перешкод іншого типу, а саме доплерівської реверберації, також може бути ослабленим із застосуванням сигналів, які характеризуються безперервним монотонним розширенням спектру.

**Метою** даної статті є аналіз результатів випробувань системи цифрового гідроакустичного зв'язку, що базується на методі формування сигналу з безупинною (монотонною) зміною частоти несучої, а також їх порівняння з результатами закордонних аналогів, що ґрунтуються на традиційних методах формування сигналів цифрового зв'язку.

### Виклад основного матеріалу

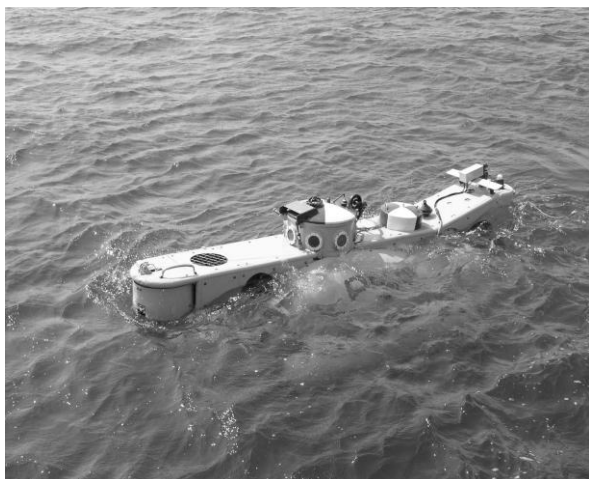
Метод передачі даних, що характеризується безупинною зміною частоти несучої (а саме, за ліній-

ним законом), реалізовано у вигляді прототипу системи цифрового гідроакустичного зв'язку на початку 2004 року в Науково-дослідному центрі Збройних Сил України «Державний океанаріум». Метод апробовано в серпні 2007 року в експерименті з обміном цифровими даними між підводним апаратом «Риф» і надводним кораблем «Кам'янка» на зовнішньому рейді м. Севастополя.

Експерименти з цифрового зв'язку проводились при практичному обстеженні підводним апарата-

том залягання на дні таких об'єктів як глибинні бомби, бочки із хімічними матеріалами, а також затопленого у ході другої світової війни літака «Дорн'є -26» (історична цінність).

Для доставки оперативної інформації про об'єкти обстеження оператор апарату «Риф» (рис. 1, а) виконував їх цифрове фотографування і за допомогою системи цифрового гідроакустичного зв'язку передавав фотографії на приймальний модуль на борт носія «Кам'янка» (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Підводний апарат "Риф" (а) перед зануренням та судно-носіє "Кам'янка" (б)

Канал передавання (поширення) сигналу характеризувався плавною зміною глибини від 68 – 70 м у місці розташування передавальної системи до 66 м у місці приймання. Відстані передавання даних змінювалися в діапазоні 100 – 600 м; передача здійснювалася з дна на поверхню. Приймальна станція була встановлена під кілем корабля на глибині 4 м, передавальна – на верхній ділянці кормової частини підводного апарату "Риф" на висоті 2 м від його основи.

Відповідно до запропонованого методу, несучий сигнал формувалася як послідовність частотно-модульованих фрагментів, які займали ефективну частотну смугу шириною 26 кГц навколо слабо вираженого резонансу частотою близько 57 кГц. Для інформаційної модуляції несучого сигналу використано схему дворазової відносної маніпуляції фазою. Експерименти проводились в умовах відносно спокійного моря при швидкості вітру 3 – 6 м/с. Передача здійснювалася як стаціонарно, так і під час взаємних переміщень передавальної та приймальної платформ зі швидкістю до 2 вузлів. Через дрейф корабля спостерігалася значна ( $\pm 40^\circ$ ) зміна орієнтації випромінюючого і приймального пристроїв.

Для випромінювання використовувався ширококутний п'єзокерамічний перетворювач РСТ Device 2 фірми РСТ Transducers (Великобританія), який мав гладку амплітудно-частотну характеристику в смузі робочих частот з нерівномірністю до 6 дБ.

Діаграма спрямованості перетворювача обмежувалася сектором  $\pm 30^\circ$  на рівні -6 дБ. Рівень випромінювання становив 192 дБ. Для приймання служив такий самий перетворювач, що й для випромінювання. Відношення сигнал/шум на приймальній стороні досягало 12 дБ.

*Характеристики каналу.* Вертикальний розріз швидкості звуку (ВРСЗ) в місці проведення експериментів, змійаний 5 серпня 2007 року на зовнішньому рейді бухти Козача, належав до так званих «теплих» розрізів [8]. Відповідно до форми ВРСЗ, поширення сигналу характеризувалося рефракцією, що вигинала траєкторії поширення променів донизу. В результаті такої рефракції передавальні сигнали зазнавали донне розсіювання. Проте, на дистанціях зв'язку менше 500 м у складі сигналу, що приймається, могли знаходитися також промені, що не зазнавали віддзеркалень від дна. Завдяки цьому, на цих дистанціях структура приймального сигналу могла містити сильно домінуючий багатопроменевий компонент, схильний лише незначним флуктуаціям. У цих умовах пропускну спроможність каналу зв'язку характеризувалася найбільшими значеннями (що підтвержене далі експериментальними значеннями, отриманими при передачі даних на дальності 100 – 400 м).

Для гідроакустичного каналу на рис. 2 наведено найбільш складний (із усіх зареєстрованих) профіль інтенсивності багатопроменевого поширення сигналу.

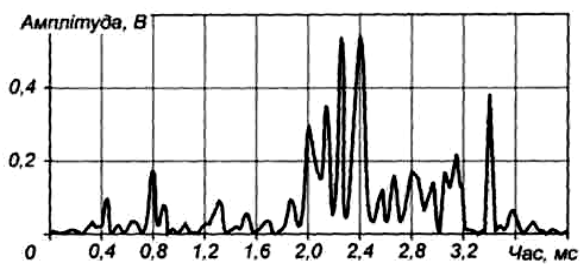


Рис. 2. Профіль інтенсивності багатопроменевого поширення сигналу в каналі зв'язку

Слід зазначити, що цей профіль був отриманий під час короткочасного перебування підводного апарату на максимальній дальності зв'язку (600 метрів). На менших дистанціях профілі склалися з 2 – 9 багатопромених компонентів з інтервалами часу між ними 0,2 – 1,5 мс. На відстанях менше 400 метрів профілі буди найменш складними і містили 2 – 3 багатопромених компонентів з інтервалами часу між ними 0,1 – 0,3 мс.

Канал не був незмінним протягом часу спостереження і не завжди той самий промінь мав максимальну енергію. Флуктуації потужності багатопромених компонентів досягали 7 дБ. Детальний аналіз структури прийнятого сигналу виявив час існування домінуючого компонента більш ніж 1 с. Максимальний надлишок часу поширення сигналу залишався сталим протягом передавання тестової послідовності і становив приблизно 1,5 мс.

*Обробка сигналу на прийомі.* Як зазначалося,

значні переваги запропонованого в [6], [7] підходу досягаються завдяки використанню несучого сигналу з безперервною зміною частоти. Після множення прийнятого сигналу на сигнал гетеродина, синхронізований з найбільш потужним багатопроменим компонентом, діапазон різницевої частоти містив значення проміжної частоти, що дорівнювали нулю для "корисного" багатопромених компонента, і ряд ненульових проміжних частот, що відповідали зміщеним у часі та за частотою "шкідливим" багатопроменим компонентам. Для усунення впливу "шкідливих" компонентів виконувалась низькочастотна фільтрація, що зумовлювала придушення компонентів багатопроменевої реверберації. Прийнятий сигнал обирав спрощену структуру надлишкової затримки поширення.

Прикладна цінність цього результату полягала в розширенні смуги когерентності каналу для кожної з частот робочого діапазону, що давало змогу застосовувати короткі інформаційні символи, отже, підвищувати швидкість передавання даних.

*Оцінка результатів передачі даних.* На рис. 3 наведено результат обробки послідовності бінарних символів, що передавалися по мілководному каналу з багатопроменевою структурою. Швидкість передавання інформації становила 10 кбіт/с. Рис. 3а відображає динаміку відношення сигнал/шум під час приймання послідовності даних, а рис. 3б - характер розсіювання відносних фазових кутів на виході фазового детектора.

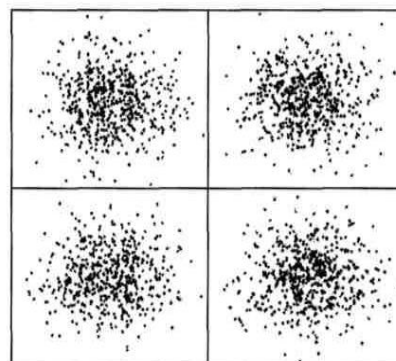
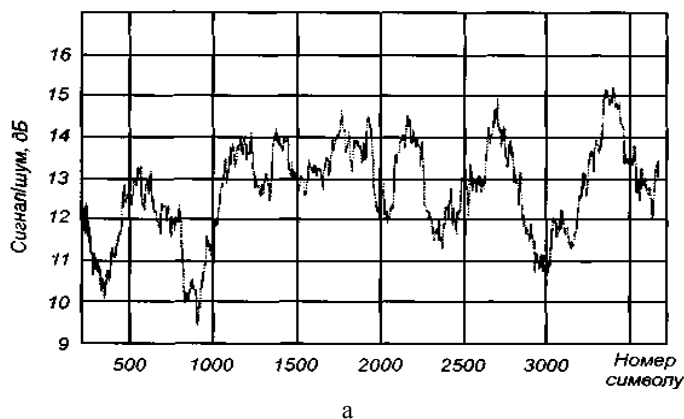


Рис. 3. Динаміка відношення сигнал/шум на приймальній стороні (а) та характер розподілу відносних фазових кутів на виході детектора (б)

Як видно з рис. 3, а, метод, запропонований для обробки сигналу з частотно-модульованою несучою, дав змогу поліпшити відношення сигнал/шум (приглушити багатопромених компоненти) в середньому до 12,5 дБ з девіацією навколо середнього значення приблизно 2,5 дБ.

Незважаючи на відносно велике розсіювання фази (фазові завади), дискретні значення фазоманіпульованих символів відокремлювались одне

від одного з якістю, достатньою для коректного відновлення інформації, що передається. Для захисту інформації від окремих похибок демодуляції застосовано схему кодування джерела даних разом з перевіркою коректності прийнятих даних за допомогою стандартного алгоритму контролю парності CRC32. Це дало змогу виконувати успішний обмін даними протягом тривалого часу (від десятків секунд до декількох хвилин). За відсутності групових

помилки (фазових завад) така схема захисту забезпечувала ймовірність виникнення бітової помилки менш як  $10^{-7}$ . У разі групових помилок алгоритм CRC32 реєстрував неможливість їх корегування і приймальна система вимагала повторного передавання зашумлених фрагментів даних до підтвердження доставки даних від приймача в повному обсязі. Найбільш імовірне пояснення такої девіації полягає в тому, що крім зміни шуму оточуючого середовища змінюється й тонка структура багатопроменевої передавального каналу, наприклад, через хвилювання поверхні, внаслідок чого недетерміновані, короткочасно існуючі промені складаються з корисним сигналом і стають йому завадою.

У менш складних передавальних каналах, наприклад тих, що характеризуються двома-трьома променями у складі профілю інтенсивності багатопроменевого поширення, швидкість передавання даних досягала вищих показників.

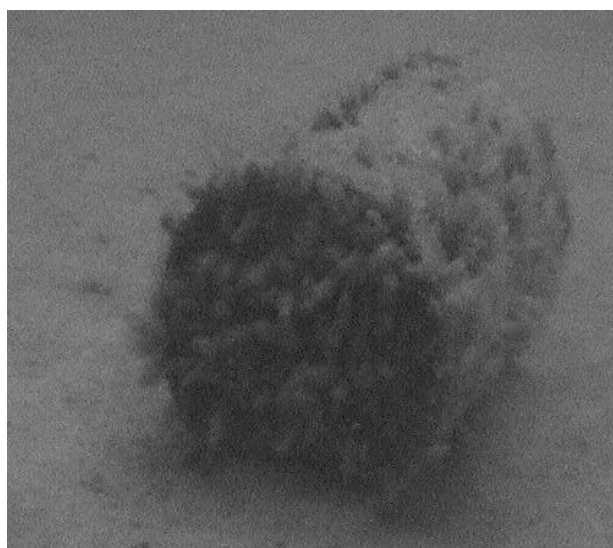
Під час здійснення практичного зв'язку між підводним апаратом "Риф" і надводним кораблем "Кам'янка" на відстані 100 – 400 м з глибини 70 м

номінальна швидкість передавання даних часто досягала 30 кбіт/с (на відстанях 400 – 600 м швидкість передавання знижувалась до 4-8 кбіт/с).

В цілому, більший проміжок часу система забезпечувала швидкість передавання цифрової інформації 18 – 24 кбіт/с, що в 3 – 5 разів перевищує швидкість роботи існуючих аналогічних пристроїв. Тривалість формування та отримання фотоінформації на приймальному модулі становила 30 – 70 с залежно від її обсягу (якості фото), властивостей акустичного каналу зв'язку та допустимої якості зображення.

На рис. 4 показано результат практичної роботи – отримані по цифровому гідроакустичному каналу цифрові фото із зображенням залягання на дні моря бочки з хімічними матеріалами та глибинної бомби.

Щоб оцінити ефективність застосування частотно-модульованого несучого сигналу, визначали час когерентності каналу після очищення прийнятого сигналу від багатопроменевих завад. Відношення швидкості передавання даних до ширини смуги частот, зайнятої переданим сигналом, дає значення коефіцієнта частотної ефективності методу близько 1 біт/Гц.



а



б

Рис. 4. Цифрові фото із зображенням залягання бочки з хімічними матеріалами на глибині 68 м (а) та глибинної бомби на глибині 70 м (б)

Згідно з даними роботи [8], коефіцієнт частотної ефективності традиційних некогерентних систем зазвичай коливається в межах 0,01 – 0,15 біт/Гц. Зареєстровано лише одну систему з максимальною частотною ефективністю 0,24 біт/Гц, яка, однак, має відносно високу ймовірність похибки передавання даних (0,01), що дорівнює гранично допустимому значенню, прийнятому для підводного зв'язку. Порівняно з традиційними системами, застосування частотно-модульованого несучого сигналу дало змогу більш ніж вдвічі збільшити коефіцієнт частотної ефективності, забезпечуючи тим самим суттєве підвищення досяжної швидкості передавання даних.

## Обговорення

Існує значна множина завдань подвійного призначення, що стосуються впровадження та практичного використання цифрової акустичної телеметрії, а саме:

картографування з оперативною доставкою візуальної інформації про поточний фрагмент покриття технічних засобів для зміни чи уточнення завдання щодо виконання картографічних робіт;

здійснення якіснішого порівняно з існуючим голосового зв'язку з кораблем-носієм;

доставка візуальної інформації про виконання поточних робіт під водою;

спостереження та підтримка робіт під час прокладання трубопроводів і кабельних мереж; вивчення особливостей місця прокладання;

доставка візуальної інформації про склад тралу під час тралення;

забезпечення телеметричних вимірювань, спостережень, інспектування, монтажу і ремонту підводної інфраструктури;

використання підводного моніторингу в ролі альтернативи слабоманеврним засобам, якими керують по кабелю (особливо в разі застосування таких засобів у відносно мілководних акваторіях).

### Висновки

Експериментальні дослідження підтвердили, що в складних гідроакустичних каналах зв'язку використання несучої, яка характеризується безперервною (монотонною) зміною частоти, дає суттєві переваги порівняно з традиційними методами. Результати передавання цифрових даних по мілководних акустичних каналах, що характеризуються високою динамікою характеристик, показали можливість здійснення зв'язку впродовж тривалого часу.

Порівняно з традиційними системами, застосування несучої з монотонним розширенням спектру дало змогу більш ніж вдвічі збільшити коефіцієнт частотної ефективності, що забезпечили суттєве підвищення досяжної швидкості передавання даних.

### Список літератури

1. *Performance Limitations in Underwater Acoustic Telemetry* / A.J. Catipovic // *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1990. – Vol. 15, No. 3. – P. 205-216.

2. *Stojanovic M. Phase-Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels* / M. Stojanovic, J.A. Catipovic, J.G. Proakis // *IEEE J. Ocean. Eng.* – Piscataway, NJ, USA: IEEE press, 1994. – Vol. 19, No. 1. – P. 100-111.

3. Склад Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение* / Б. Склад. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

4. *Mattews A.D. Doppler Tolerant Link* / A.D. Mattews, R.L. Higginbotham // *J. Acoust. Soc. Am., Proceedings of ICA/ISA '98 Congress, 20-26 June, Seattle, Washington.* – Melville, NY, USA: ASA, 1998. – P. 317-318.

5. *Neasham J.A. Combined Equalisation and Beamforming to Achieve 20 kbits/s Acoustic Telemetry for ROVs* / J.A. Neasham // *IEEE J. Ocean. Eng.* – Piscataway, NJ, USA: IEEE press, 1996. – Vol. 8. – P. 988-993.

6. *Kebkal K.G. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation* / K.G. Kebkal, R. Bannasch // *J. Acoust. Soc. Am.* – Melville, NY, USA: ASA, 2002. – Vol. 112. – P. 2043-2052.

7. *Kebkal K.G. Digitale akustische Datenübertragung über ein System kontinuierlich veränderlicher Frequenzen* / K.G. Kebkal. – Berlin: Technische Universität Berlin, Deutschland, 2000. – Doktorarbeit D83. – 158 p.

8. Дивизинюк М.М. *Акустические поля Черного моря* / М.М. Дивизинюк. – Севастополь: Гос. океанариум, 1998. – 352 с.

9. *Kilfoyle D.B. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry* / D.B. Kilfoyle, A.B. Baggeroer // *IEEE J. Ocean. Eng.* – Piscataway, NJ, USA: IEEE press, 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.

Надійшла до редколегії 7.10.2009

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. М.М. Дивизинюк, Севастопольський національний університет ядерної енергії і промисловості, Севастополь.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ (БЕСПРОВОДНОЙ) СВЯЗИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К.Г. Кебкал

Приведены основные результаты физических экспериментов прототипа системы цифровой гидроакустической связи, реализующей метод монотонного расширения спектра сигнала. Система показала способность обеспечивать качественный прием цифровой информации в сложных динамических многолучевых каналах. По сравнению с традиционными системами использование несущей с монотонным расширением сигнала позволило более чем вдвое повысить коэффициент частотной эффективности, обеспечивая тем самым существенное увеличение достигаемой скорости передачи данных.

**Ключевые слова:** подводная телеметрия, цифровая связь, бескабельная подводная связь, гидроакустическая связь.

### THE TRIALS RESULTS OF IMPROVED SYSTEM OF DIGITAL HYDRO-ACOUSTIC (WIRELESS) COMMUNICATION FOR TWOFOLD-PURPOSE TASKS

K.G. Kebkal

There are represented the experimental results of data transmission carried out with a prototype of digital hydro-acoustic communication system that realizes the method of monotonous spread of signal frequency spectrum. The system demonstrated the ability to provide a high-quality transfer of digital data in complicated multipath channels comprising large dynamics of their characteristics. In comparison to conventional systems the use of monotonous frequency spread on transmit signals provided more than twice increase of frequency efficiency coefficient and thus significant enlarge of achievable data rate.

**Keywords:** underwater telemetry, digital communication, wireless underwater link, hydro-acoustic communication.