

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО ЧАСОВЕ УПОРЯДКУВАННЯ ФАЗО-МАНІПУЛЬОВАНИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ З БЕЗПЕРЕРВНОЮ РОЗГОРТКОЮ НЕСУЧОЇ

Представлені результати чисельного моделювання і експериментального дослідження методу псевдовипадкового упорядкування цифрових гідроакустичних сигналів з безперервною розгорткою несучої під час передачі даних в гідроакустичному каналі з характеристиками підвищеної складності. Отримані залежності дозволяють здійснювати вибір тривалості фрагментів розгортки несучої і інтервалу псевдовипадкових пауз між ними для оптимізації швидкості і достовірності передачі даних з урахуванням актуальних характеристик каналу зв'язку.

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

Вступ

Істотне підвищення продуктивності засобів цифрового гідроакустичного зв'язку останніми роками багато в чому пов'язане з впровадженням несучої, що характеризується безперервним розширенням спектру. У роботах [1], [2] був запропонований і випробуваний метод формування цифрового гідроакустичного сигналу, що дозволяє успішно передавати значні об'єми цифрових даних на дистанцію більше 6 км [3]. Залежно від дистанції зв'язку середнє значення номінальної швидкості передачі даних у фізичних експериментах варіювало від 2.4 до 4.8 кбіт/с. Порядок вірогідності бітової помилки був 10^{-5} .

Досягнуті характеристики продуктивності забезпечують в межах багатьох практичних завдань реально-часовий режим обміну даними, наприклад, між донними автономними сенсорними пристроями і поверхневими плавзасобами, між донними автономними сенсорними пристроями підводної мережі і об'єктами, що динамічно підключаються.

Проте, продемонстрована швидкість і достовірність передачі даних зазвичай не досягається в гідроакустичних каналах із значною мінливістю характеристик поширення сигналу, наприклад, між під час передачі даних між об'єктами, що переміщуються, при значній взаємній радіальній швидкості руху. У таких каналах профіль інтенсивності багатопроменевого поширення швидко змінюється, а поточні налаштування несучої [4], зокрема, тимчасове упорядкування фрагментів розгортки несучої, швидко втрачають актуальність.

При цьому достовірність передачі даних, яка (при незмінності інших показників продуктивності) значною мірою залежить від інтенсивності багатопроменевого поширення і мінливості його характеристик, може істотно знижуватися.

Для протидії зниженню достовірності передачі даних в гідроакустичних каналах з невідомим профі-

лем інтенсивності багатопроменевого поширення і швидкою мінливістю характеристик поширення, в роботі [1] розроблений метод, згідно з яким фрагменти безперервної розгортки несучої передавального сигналу упорядковуються в часі псевдовипадковим чином.

Мета даної роботи полягає в чисельному і експериментальному дослідженні цього методу на предмет можливостей підвищення достовірності передачі цифрових даних в умовах гідроакустичних каналів з характеристиками підвищеної складності.

Оскільки найбільшу частотну ефективність забезпечує фазова маніпуляція сигналу з безперервною розгорткою несучої [5], як критерій, по якому визначається міра підвищення достовірності передачі цифрової інформації, використана дисперсія оцінки фази приймального сигналу.

Чисельне моделювання і експериментальна верифікація

Очевидним шляхом підвищення швидкості передачі цифрових даних представляється скорочення тривалості сигналу зв'язку, що дозволяє передавати більшу кількість сигналів за одиницю часу. Через обмеженість доступної смуги несуча з безперервною варіацією частоти складається з послідовності фрагментів варіації частоти (або, по-іншому, розгортки несучої), обмежених зверху і знизу межами робочої смуги частот і упорядкованих у часі один за одним без пауз або із затримкою. У якийсь момент, при скороченні тривалості сигналу зв'язку, сигнал, що приймається, може зазнавати спотворення із-за одночасного приходу на прийом поточного символу даних і променевого компонента, що запізнюється. В результаті кількох таких збігів міжсимвольна інтерференція і відповідні до неї перешкоди можуть досягати істотних величин і приводити до групових помилок передачі цифрових даних, і, відповідно, зниження достовірності передачі інформації.

Для зменшення міжсимвольної інтерференції можна використовувати тривалі паузи між сигналами зв'язку, що перевищують час надлишкової затримки поширення сигналу [5]. Але збільшення пауз призводить до адекватного зниження швидкості передачі даних.

Інший спосіб боротьби з міжсимвольною інтерференцією полягає в упорядкуванні послідовності цифрових сигналів в часі так, щоб з урахуванням виміряного профілю інтенсивності багатопробеневого поширення такі збіги виключалися. Проте таке упорядкування може забезпечувати зниження міжсимвольної інтерференції лише за умови роботи в каналах з незмінним профілем інтенсивності багатопробеневого поширення, принаймні, між поточним і повторним виміром профілю.

У гідроакустичних каналах з характеристиками, що швидко змінюються, виконання цієї умови не забезпечується, послідовності цифрових сигналів, що приймаються, можуть спотворюватися протягом тривалого часу. При довгому часі когерентності каналу ділянка послідовності, що містить групові помилки, може бути настільки великою, що вживання способів «перемішування» сигналів може не забезпечувати рівномірного розподілу помилок з допустимою частотою зустрічаємості.

Для протидії таким спотворенням в [1] запропонований метод псевдовипадкового упорядкування цифрових сигналів в часі, що передбачає розставляння псевдовипадкових пауз між сигналами передавальної послідовності. Такий метод здатний за-

безпечити відсутність множинних збігів поточного сигналу з багатопробеними компонентами попереднього сигналу, що запізнюються, і, відповідно до цього, можливість вживання стандартних алгоритмів перешкодозахищеного кодування і коротких циклів перемішування даних [6].

Рис. 1 демонструє залежність дисперсії оцінки фази σ_ϕ сигналу від тривалості нормованого інтервалу часу, на якому рівномірно розподіляється псевдовипадкова пауза. Залежність отримана в результаті чисельного моделювання послідовності фазоманіпульованих сигналів з лінійною розгорткою несучої. В процесі чисельного моделювання передавалася послідовність з 1000 символів даних тривалістю 400 мкс кожний в частотній смузі 50–75 кГц. Для кодування сигналу використовувалася двократна фазова маніпуляція.

Отримана залежність є експоненціальною. Спостерігається двократне зменшення дисперсії оцінки фази при зростанні нормованого інтервалу значень псевдовипадкової паузи від 0 до 1. На рис. 2 для такої ж послідовності символів даних представлена залежність дисперсії оцінки фази від нормованої швидкості передачі даних. Нормування швидкості R_a виконане по ширині смуги частотної когерентності каналу ΔF . Із зменшенням тривалості сигналу (збільшенням швидкості передачі R_a) спостерігається зростання дисперсії оцінки фази по статичній залежності. На обох рисунках крапками позначені дані, отримані при чисельному моделюванні, а штриховою лінією позначена апроксимуюча крива.

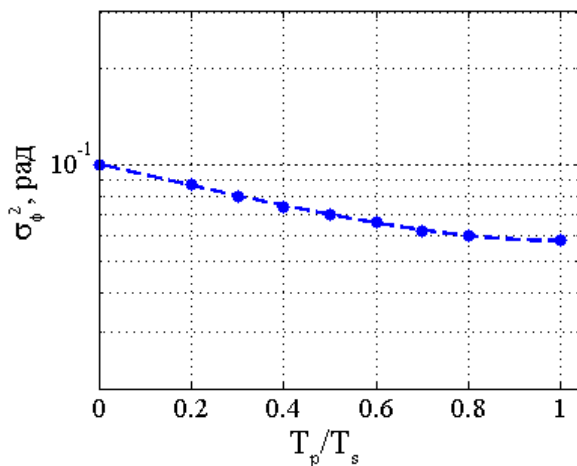


Рис. 1. Розрахункова залежність дисперсії оцінки фази від нормованої тривалості псевдовипадкової паузи

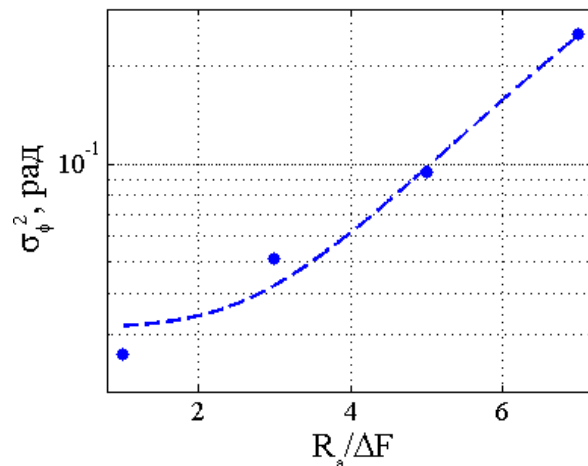


Рис. 2. Розрахункова дисперсії оцінки фази від нормованої швидкості передачі даних

Верифікація результатів чисельного моделювання виконана при проведенні експериментів з передачею даних в морській акваторії з глибинами 15–20 м при горизонтальній передачі сигналів від випромінювача, розміщеного на глибині 5 м, до приймача на глибині 10 м на дальності від 0.5 до 1.2 км.

Цифрові сигнали формувалися із застосуванням двократною відносною фазовою маніпуляцією в смузі 50 і 75 кГц, мали тривалість 200, 400 і 700 мкс, і випромінювалися п'єзокерамічним випромінювачем компанії Neptun Sonars, Великобританія (тип T216). Блоки містили по 1000 сигналів і передавалися бага-

торазово, від 57 до 125 разів кожний. Рис. 3 демонструє експериментальні залежності дисперсії оцінки фази від тривалості інтервалу значень псевдовипадкової паузи. На рисунку суцільна лінія відображає отриману залежність для інтервалу випадкових пауз тривалістю 700 мкс, штрихова – для інтервалу

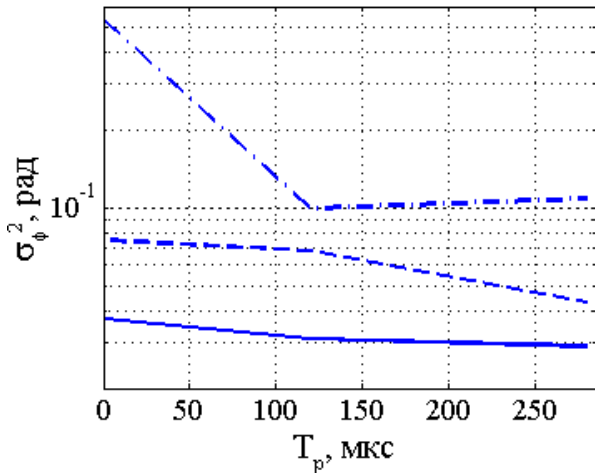


Рис. 3. Експериментальна залежність дисперсії оцінки фази від нормованої тривалості псевдовипадкової паузи

Аналіз узгодженості результатів чисельного моделювання і експериментальних даних виконаний для сигналів тривалістю $T_s = 400$ мкс. Як впливає з порівняння кривих на рис. 1 і 3, при такій тривалості сигналу і тривалості інтервалу псевдовипадкової паузи $T_p=120$ мкс (тобто при $T_p/T_s = 0.3$) дисперсія оцінки фази складає 0.070 рад (рис. 3) при очікуваному значенні 0.079 рад (рис. 1). При $T_p=280$ мкс ($T_p/T_s = 0.7$) дисперсія оцінки фази складає 0.044 рад при очікуваному значенні 0.059 рад.

Деяка розбіжність результатів моделювання експериментів, порядку 15–20 %, пояснюються наступними відмінностями умов каналу зв'язку при чисельному моделюванні і в експериментах. Зокрема, моделювання виконувалося при постійному значенні середньоквадратичного розкиду затримок поширення багатопроменевих компонентів сигналу $\sigma_\tau=224.1$ мкс, тоді як при такому ж середньому σ_τ експериментальне значення розкиду затримок флукутувало в межах 110–305 мкс.

Те ж відноситься і до значень вхідного відношення сигнал/шум. При моделюванні задавалося постійне середнє значення вхідного відношення сигнал/шум $SNR_m = 18$ дБ, а в експериментах воно флукутувало від 13.6 до 20.9 дБ. Приймаючи до уваги ці обставини, результати чисельного моделювання і експериментів, що демонструють розбіжність в межах 15–20 %, можна вважати добре погодженими.

Такий же вивід про узгодженість можна зробити і для залежності дисперсії оцінки фази від швидкості передачі даних. При тривалості сигналу $T_s = 400$ мкс

400 мкс, штрих-пунктирна – для інтервалу 200 мкс. Спостерігається монотонне зменшення дисперсії при збільшенні інтервалу значень псевдовипадкової паузи. Діапазон зміни зростає із зменшенням тривалості сигналу. Розсіювання фази виражене у меншій мірі для триваліших сигналів.

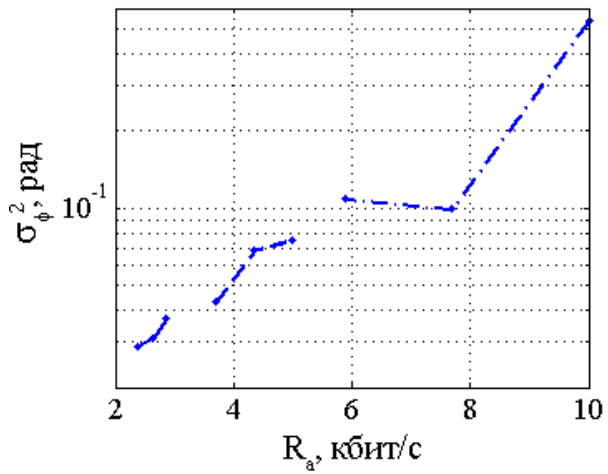


Рис. 4. Експериментальна залежність дисперсії оцінки фази від нормованої швидкості передачі даних

і швидкості передачі даних $R_a = 4$ кбіт/с ($R_a/\Delta F = 4.5$) дисперсія оцінки фази складає 0.052 рад (рис. 4) при очікуваному значенні 0.067 рад (рис. 2). При $R_a = 5$ кбіт/с ($R_a/\Delta F = 5.6$) дисперсія оцінки фази складає 0.075 рад при очікуваному значенні 0.097 рад. Таким чином, узгодженість даних чисельного моделювання і експериментів в межах тих же 20% зберігається.

Для кількісної оцінки ефекту псевдовипадкового упорядкування цифрових гідроакустичних сигналів з безперервною розгорткою несучої на достовірність передачі розглянемо наступний приклад. Припустимо, що передається послідовність двократно маніпульованих за фазою сигналів з безперервною розгорткою несучої, кожен з яких має тривалість 400 мкс. Гідроакустичний канал характеризується щільно заповненим профілем інтенсивності багатопроменевого поширення з $\sigma_\tau=224.1$ мкс, і динамікою, що обумовлює багатократну зміну профілю інтенсивності багатопроменевого поширення протягом передачі послідовності сигналів.

У першому випадку послідовність сигналів (послідовність розгортки несучої) передається без пауз. У другому випадку ця послідовність містить псевдовипадкові паузи між розгортками, рівномірно розподілені на інтервалі 200 мкс. Відповідно до рис. 1 у першому випадку слід чекати дисперсії фази близько 0.1 рад, а в другому близько 0.07 рад.

В разі прийняття гаусового розподілу значень оцінюваної фази [7], це відповідає підвищенню вхідного відношення сигнал/шум з 11.9 дБ до 13.5 дБ, тобто на 1.6 дБ. Така зміна буде обумовлювати, на-

приклад, при двократній відносній фазовій маніпуляції, зниження порядку вірогідності бітової помилки з 10^{-2} до 10^{-4} , тобто значне підвищення достовірності передачі цифрової інформації.

Висновки

1. Результати чисельного моделювання і експериментальної верифікації підтвердили ефективність методу псевдовипадкового упорядкування цифрових гідроакустичних сигналів з безперервною розгорткою несучої під час передачі даних в гідроакустичному каналі з характеристиками підвищеної складності.

2. Отримані в роботі залежності демонструють значне (десятки відсотків) зниження дисперсії оцінки фази при використанні псевдовипадкової паузи між розгортками несучої (порядку декілька десятих від тривалості цифрового сигналу), що еквівалентно зменшенню рівня фазового шуму на одиниці децибел, і відповідно, зменшенню порядку вірогідності бітої помилки. Підвищення достовірності передачі даних очевидно.

3. Результати чисельного моделювання і експериментальної верифікації демонструють здатність методу забезпечувати відсутність множинних збігів поточного сигналу з багатопроменевими компонентами попереднього сигналу, що запізнюються, і, відповідно до цього, можливість вживання стандартних алгоритмів перешкодо-захищеного кодування і коротких циклів перемішування даних.

4. Практична користь отриманих залежностей полягає в можливості варіювання тривалістю сигналу і інтервалом псевдовипадкової паузи для забезпечення необхідної швидкості і достовірності передачі даних при заданій ширині робочої смуги частот навіть при невідомих тимчасових характеристиках профілю інтенсивності багатопроменевого поширення сигналу. Достатньою для цієї мети є наявність стійкішого для

динамічного каналу показника інтенсивності багатопроменевого поширення сигналу – вимірюючого значення середньоквадратичного розкиду затримок поширення променевих компонентів сигналу.

Список літератури

1. Патент 72292 Україна, H04L27/10, H04B1/69. Способи і апаратні засоби передачі і прийому інформації / Кебкал К.Г., Баннаш Р.; заявник і патентовласник Кебкал К.Г., Баннаш Р. – №2002065144; заяв. 20.12.2000; опубл. 15.02.2005, Бюл. №2.
2. Кебкал К.Г. Экспериментальное исследование нового способа формирования сигнала связи при передаче цифровой информации в протяженных гидроакустических каналах / К.Г. Кебкал, А.Ж. Ермоленко // Збірник наукових праць. – Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2007. – Вип. 2(12). – С. 109-114.
3. Кебкал К.Г. Метод цифровой передачи данных в горизонтально-стратифицированных подводных акустических каналах / К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, С.Г. Яковлев // Акустический журнал. – М.: Наука, 2004. – Т. 50, № 2. – С. 220-230.
4. Кебкал К.Г. Эксперимент по цифровой гидроакустической связи между судном и буксируемым сенсором в реальном масштабе времени / К.Г. Кебкал // Зб. наук. пр. – Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2008. – Вип. 2(15). – С. 58-65.
5. Kilfoyle D.B. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry / D.B. Kilfoyle, A.B. Baggeor // IEEE J. Ocean. Eng. – Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Center, 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.
6. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение, 2-е издание: пер. с англ. / Б. Склад. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
7. Кебкал К.Г. Оценка плотности вероятности распределения параметров гидроакустического сигнала связи с вобулированной несущей в многолучевом канале // Збірник наукових праць СМУЯЕтаП. – Севастополь: СМУЯЕтаП, 2009. – Вип. 2(30). – С. 209-219.

Надійшла до редколегії 2.09.2010

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

К ВОПРОСУ О ВРЕМЕННОМ УПОРЯДОЧЕНИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗВЕРТКОЙ НЕСУЩЕЙ

К.Г. Кебкал

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования метода псевдослучайного упорядочивания цифровых гидроакустических сигналов с непрерывной разверткой несущей при передаче данных в гидроакустическом канале с характеристиками повышенной сложности. Полученные зависимости позволяют осуществлять выбор длительности развертки несущей и интервала псевдослучайных пауз между ними для оптимизации скорости и достоверности передачи данных с учетом актуальных характеристик канала связи.

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

ABOUT THE TIME ARRANGEMENT OF PHASE-MANIPULATED HYDRO-ACOUSTIC SIGNAL WITH CONTINUOUS FREQUENCY SPREAD

K.G. Kebkal

The results of numerical modelling and experimental investigation are represented, concerning investigation of method of time arrangement of phase-manipulated hydro-acoustic signal with continuous frequency spread during data transmission in hydro-acoustic channels with characteristics of extended complexity. The dependencies, which were obtained, enable the possibility to adjust the sweep-spread sections duration and interval of the pseudo-random pauses between them for optimisation of bit rate and likelihood of data transmission with consideration of actual characteristics of the communication channel.

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