

# МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 681.3, 621.3

В. Голембо, О. Бочкарьов, А. Гребеняк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин

## ПРОБЛЕМА ОРГАНІЗАЦІЇ УЗГОДЖЕНИХ КОЛЕКТИВНИХ ДІЙ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

© Голембо В., Бочкарьов О., Гребеняк А., 2009

**Розглянуто проблему організації спільних узгоджених дій колективу автономних мобільних підводних апаратів. Запропоновано узагальнений підхід до вирішення цієї проблеми та способи перевірки і тестування відповідних алгоритмів колективної поведінки автономних підводних апаратів.**

**The problem of organization of joint coordinated actions of a collective formed by mobile autonomous underwater vehicles (AUV) is considered. The generalized approach to solve the problem and methods of verification and testing of the corresponding algorithms of AUVs' collective behaviour are proposed.**

### Вступ

Не має сумнівів, що значення океану та загалом водного середовища в ХХІ ст. продовжить зростати. На дні морів та водоймищ, у водній товщі, на континентальному морському шельфі, на річках та озерах, суднохідних каналах, у акваторіях портів, у доках суднобудівельних та судноремонтних заводів виконуються великі за об'ємом та складністю дослідницькі та інженерно-технічні роботи. Прикладами таких робіт можуть бути наукові океанологічні дослідження; збирання даних для метеорологічних прогнозів; екологічний моніторинг; вантажно-підйомні та рятувальні роботи; будівництво підводних трубопроводів та інших споруд; археологічні дослідження тощо. Як особливо важливе з огляду на останні виклики у сфері забезпечення національної та міжнародної безпеки слід також згадати завдання контролювання територіальних вод України, зокрема виявлення та відстеження порушників не тільки на водній поверхні, а також у водних глибинах. Для виконання усіх цих завдань потрібна сучасна підводна техніка, зокрема автономні мобільні підводні апарати (АМПА) [1–3], роботи, над створенням яких інтенсивно ведуться у провідних державах світу. Така техніка потрібна і Україні як морській державі. Актуальність цього питання підтверджується також основними положеннями рішення Ради національної безпеки і оборони України №463 «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» від 20 травня 2008 року.

### Стан проблеми

Сучасний стан і напрями розвитку в галузі підводних апаратів в Україні висвітлені в роботах [1,2]. Існуючі підводні апарати (ПА) дуже різноманітні. Наприклад, в роботі [2] підводні апарати поділяються на буксирувані пошукові ПА, пошукові пілотовані прив'язні самохідні ПА, пілотовані самохідні ПА, спеціалізовані заглиблювані безпілотні робочі ПА. Одним з найперспективніших видів ПА, на нашу думку, є автономні мобільні підводні апарати. Сьогодні в світі розроблено та виготовлено більше сотні моделей таких апаратів більше ніж півсотнею фірм та організацій-виробників [3]. Ці АМПА інтенсивно застосовуються на практиці для виконання океанологічних досліджень та інших переважно військових задач. Проведений нами аналіз показав, що з наведеного у [3] переліку АМПА дуже мала частина апаратів є повністю безпілотними, тобто такими, що не потребують оператора (пілота) для керування в процесі виконання поставлених задач. При цьому йдеться про повністю автономні апарати, здатні сприймати стани навколишнього середовища і цілеспрямовано реагувати на їх зміну, самостійно вирішуючи поставлені перед ними задачі. Дослідження та проектування таких

АМПА активно ведеться в військово-морській академії США [4], в лабораторіях Массачусетського технологічного інституту [5], в лабораторіях Міжнародного об'єднання спостереження за океаном (International Coalition of Ocean Observing Laboratories) [6], в лабораторіях Принстонського університету [7] та в інших науково-дослідних закладах.

При цьому відкритим залишається важливе питання забезпечення сумісної узгодженої роботи групи таких апаратів (колективу АМПА) за умов відсутності централізованого управління та обмеженої локальної інформаційної взаємодії АМПА. Перевага "колективної" роботи АМПА над індивідуальною зрозуміла хоча б з міркувань про витрати часу: колектив АМПА виконає завдання значно швидше ніж це зробить окремий АМПА. Більше того, сумісна робота декількох АМПА відкриває якісно нові функціональні можливості порівняно з можливостями окремого АМПА. Наприклад, такі задачі, як пошук риби для рибальських флотилій, пошук затонулих об'єктів, переміщення всередині затонулого судна, розподілений моніторинг деякого параметра водного середовища в реальному часі, охоронне патрулювання підводної території та багато інших задач можуть бути вирішені колективом АМПА значно краще ніж окремим АМПА. Над вирішенням зазначеної проблеми активно працюють декілька науково-дослідних груп [8–10]. Саме способи організації такої колективної взаємодії АМПА і є новим перспективним напрямком, якому присвячена наша робота. Слід зауважити, що наша зацікавленість саме цією проблематикою ґрунтується як на наших роботах в сфері морського приладобудування [11–13], так і на роботах в сфері колективної поведінки автономних агентів [14–16]. Спираючись на цей досвід, ми бачимо основний недолік сучасних підходів до вирішення зазначеної проблеми у надмірному заглибленні в специфічні деталі роботи окремого АМПА та намагання отримати рішення на рівні відповідних сигналів управління та вхідної сенсорної інформації. Іншими словами, переважна більшість запропонованих рішень сильно залежать від специфіки обраного авторами цих рішень способу організації переміщення та інших аспектів роботи АМПА (цей вибір, як правило, обумовлений особливостями конструкції певного АМПА, з яким працюють ці дослідники). У результаті таких "розрізнених" зусиль сьогодні існують рішення лише окремих вузьких підзадач загальної проблеми, більшість яких прив'язані до специфічної конструкції певного АМПА.

#### **Постановка задачі**

Метою статті є розробити узагальнений підхід до вирішення проблеми організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів, який би дозволяв знаходити універсальні гарантовані розв'язки на вищому "організаційному" рівні прийняття рішень, тобто на рівні координації спільних колективних дій АМПА. Розробити порядок застосування цього підходу та запропонувати способи перевірки і тестування відповідних алгоритмів колективної поведінки АМПА.

#### **Розв'язання задачі**

Основні труднощі при вирішенні проблеми організації узгоджених колективних дій АМПА полягають у тому, що, по-перше, внаслідок знаходження АМПА в агресивному водному середовищі, присутня висока ймовірність втрати кожного окремого АМПА, і, по-друге, можливості обміну інформацією між АМПА обмежені порівняно невисокою пропускнуою здатністю каналів зв'язку (організованих, наприклад, за допомогою акустичних модемів). Внаслідок цього виникає потреба у використанні ресурсу децентралізованого управління [14–17], за рахунок чого: 1) досягається висока надійність (система працює доти, доки в її складі лишається хоча б один працездатний АМПА і не залежить від коливань чисельності "популяції" АМПА); 2) гарантується мале навантаження на канали зв'язку між АМПА. Разом з цим ми пропонуємо враховувати ідею самоорганізації колективу АМПА, розуміючи під самоорганізацією процес "впорядковуючого" об'єднання АМПА (збільшення негентропії системи) у єдиний колектив, функціональні можливості якого вищі за просту суму можливостей окремих АМПА, та який здатний адаптуватись до впливів зовнішнього середовища шляхом зміни своєї структури та функцій.

Враховуючи ідею самоорганізації колективу АМПА, а також спираючись на: 1) принцип ієрархії ("вкладеності") процесів управління та прийняття рішень [17], застосування якого дає змогу абстрагуватись від специфіки способу організації переміщення та інших аспектів роботи окремого АМПА та 2) принцип функціональної декомпозиції (розбиття задачі на підзадачі), можна запропонувати такий набір базових службових алгоритмів колективної поведінки АМПА, який складається з двох частин: "управлінської" (A1) та функціональної (A2):

- A1-1. Самовиявлення колективу АМПА.
- A1-2. Самоіменування колективу АМПА.
- A1-3. Самоузгодження колективу АМПА.

- A2-1. Самоорганізація колективу АМПА у просторі.
- A2-2. Самоорганізація колективу АМПА у часі.
- A2-3. Самоорганізація колективу АМПА за параметром.

Алгоритми, які входять до "управлінської" частини набору А1, відповідають за підтримку організаційної інфраструктури колективу АМПА. Під самовиявленням колективу розуміємо отримання кожним АМПА інформації про інші АМПА (які, наприклад, знаходяться в зоні видимості засобів детектування або зв'язку даного АМПА) з метою сформуванню "зв'язний" колектив. Формат та зміст цієї інформації визначається розробником у межах відповідної моделі інформаційної взаємодії АМПА. Під самоіменуванням розуміємо процес породження множини унікальних у межах колективу імен (ідентифікаторів) АМПА, тобто перехід від набору можливо однакових величин-ідентифікаторів АМПА до набору гарантовано різних величин-ідентифікаторів, зокрема в умовах коливання чисельності колективу (вибуття одних АМПА і входження в колектив інших АМПА). Під самоузгодженням колективу АМПА розуміємо процес погодження усіма АМПА, що входять до колективу, деякої однакової для всіх величини, тобто перехід від набору можливо різних величин до набору однакових для всіх АМПА величин (задачі цього класу також називають задачами на пошук консенсусу).

Алгоритми, які входять до функціональної частини набору А2, забезпечують базову функціональність колективу АМПА. Самоорганізацією колективу АМПА у просторі вважають здатність колективу цілеспрямовано управляти розміщенням та переміщенням своїх представників у просторі, враховуючи поставлені перед ним задачі вищого рівня. До алгоритмів просторової самоорганізації зокрема належать: 1) впорядковане розміщення АМПА у просторі (розгортання колективу): рівномірне заповнення обмеженого деякими границями простору; формування правильної решітки із заданим кроком; формування гнучкої решітки, форма якої залежить від характеристик навколишнього середовища; 2) "формування" геометричних фігур: лінії, кола, квадрата і т.п. із заданим кроком між АМПА; 3) впорядковане переміщення АМПА у просторі (узгоджене групове переміщення, переміщення за схемою "лідер-наслідувач", слідування заданій траєкторії руху і т.п.); 4) уникнення зіткнень з іншими АМПА у процесі переміщення; 5) колективне подолання (оминання) перешкод та ін. Під самоорганізацією колективу АМПА в часі розуміємо процес синхронізації дій АМПА у фізичному часі або логічному часі (з урахуванням лише послідовності подій) за умов відсутності "зовнішнього годинника" (тобто єдиного центра, який забезпечує "примусову" синхронізацію), локальної обмеженої взаємодії між АМПА та змінних не відомих наперед затримок при обміні синхронізуючими сигналами. Самоорганізацією колективу АМПА за параметром вважають здатність АМПА узгоджувати свої дії (наприклад, переміщення) на основі показів своїх сенсорних підсистем. До алгоритмів параметричної самоорганізації зокрема належать: 1) рух колективу АМПА вздовж лінії рівня деякого параметра навколишнього середовища (наприклад, температури); 2) виявлення та оточення зони збурень навколишнього середовища (наприклад, виявлення та оточення нафтової плями); 3) рівномірний розподіл АМПА ув межах виявленої зони збурень; 4) уникання АМПА зони збурень; 5) супроводження АМПА зони збурень, що переміщується в просторі та ін.

Основні вимоги, які висуваються до базових алгоритмів колективної поведінки з набору {A1,A2}, такі: 1) робота в реальному масштабі часу: вибір рішення окремим АМПА має займати деякий незмінний проміжок часу, який не перевищує заданої величини затримки; 2) локальність поведінки: алгоритм колективної поведінки має бути поданий у вигляді алгоритмів індивідуальної поведінки АМПА; 3) локальність взаємодії: алгоритм колективної поведінки має коректно працювати в умовах обмеженої інформаційної взаємодії агентів (наприклад, в умовах обмеженого радіусу видимості засобів зв'язку АМПА); 4) уніфікованість ("однаковість"): всі АМПА мають виконувати один і той самий локальний алгоритм (для випадку повністю однорідного колективу АМПА); 5) незалежність від кількості АМПА: алгоритм колективної поведінки має продовжувати працювати коректно, незважаючи на зміни чисельності колективу (наприклад, внаслідок виходу деяких АМПА з ладу). Основними показниками ефективності роботи алгоритмів {A1,A2} є час виконання алгоритму (мета – мінімізація кількості часових кроків) та використання енергетичних, обчислювальних та комунікаційних ресурсів (мета – мінімізація витрат ресурсу). Окремо може

розглядатись питання "функціональної повноти" запропонованого набору службових алгоритмів  $\{A1, A2\}$ , до якого ми плануємо повернутись в наступних роботах.

Отже, за узагальненим підходом шукати напрями рішень проблеми організації узгоджених колективних дій АМПА можна одночасно на двох рівнях: 1) інфраструктурному рівні (розроблення службових алгоритмів у межах набору  $\{A1, A2\}$ ) та 2) прикладному рівні (розроблення складних процедур колективної поведінки з використанням службових алгоритмів  $\{A1, A2\}$  як "готових" складових елементів). Своєю чергою, складні процедури колективної поведінки прикладного рівня, які можуть бути достатньо формалізовані (до них, наприклад, належать процедури пошуку, патрулювання, моніторингу та ін.) також можуть бути виділені в окремий проміжний рівень і використовуватись надалі як "готові" рішення.

Слід також зазначити такий важливий аспект проблеми, як організація інформаційної взаємодії АМПА у складі колективу. Значні здобутки у вирішенні цього питання отримано у галузі дослідження мобільних безпроводних мереж (mobile wireless networks) [18]. Однак деякі моменти заслуговують на особливу увагу, оскільки вони можуть безпосередньо впливати на роботу алгоритмів за набору  $\{A1, A2\}$ . Наприклад, вирішення задачі утримання інформаційної зв'язності колективу АМПА за умов обмежених радіусів видимості їхніх засобів зв'язку може розглядатись як одна із задач просторової самоорганізації А2-1, оскільки в процесі переміщень АМПА присутня загроза того, що колектив "розпадеться" на два чи більше відокремлених колективи (у ширшому плані це питання може розглядатись як розв'язання задачі управління інформаційною зв'язністю колективу). Крім того, на можливості алгоритмів з набору  $\{A1, A2\}$  може значно вплинути тип моделі інформаційної взаємодії АМПА у колективі. Зокрема можна виділити чотири основних типи в порядку збільшення можливостей щодо інформаційної взаємодії: 1) АМПА не детектують один одного (інформаційна взаємодія агентів відсутня); 2) окремий АМПА детектує інші АМПА, але не розрізняє їх між собою (тобто відсутня будь-яка додаткова інформація, що пов'язується з іншим АМПА); 3) окремий АМПА детектує інші АМПА та розрізняє їх між собою, пов'язуючи з кожним з них деяку додаткову інформацію (наприклад, відстань до даного АМПА та напрямок на нього); 4) окремий АМПА детектує інші АМПА та розрізняє їх за допомогою унікальних в межах всього колективу ідентифікаторів. Ще один важливий аспект проблеми – спосіб організації витрат енергоресурсу колективом АМПА та можливо спосіб його поповнення – заслуговує на розгляд в окремій публікації.

### **Порядок застосування підходу та способи перевірки алгоритмів колективної поведінки АМПА**

Можна запропонувати такий порядок застосування узагальненого підходу: 1) сформувати набір базових службових алгоритмів колективної поведінки  $\{A1, A2\}$ ; 2) розробити набір тестових натурних експериментів з АМПА у підводному середовищі для демонстрації коректної роботи алгоритмів з набору  $\{A1, A2\}$ ; 3) здійснити комп'ютерне моделювання (обчислювальний експеримент та візуалізація) роботи алгоритмів з набору  $\{A1, A2\}$  у розроблених тестових натурних експериментах (відлагодивши відповідні алгоритми); 4) здійснити розроблені тестові натурні експерименти у лабораторних умовах (використовуючи експериментальний басейн або кораблебудівний док, в яких можна контролювати зміну параметрів водного середовища (швидкість течії, турбулентність потоків води, температуру, та ін.)), щоби досягти чіткої повторюваності бажаних результатів; 5) перенести розроблені тестові натурні експерименти в реальне водне середовище, змінивши їх відповідним чином з урахуванням того, що "неконтрольовані" зміни параметрів водного середовища можуть негативно вплинути на повторюваність бажаних результатів.

Для перевірки та тестування алгоритмів колективної поведінки АМПА з набору  $\{A1, A2\}$  можна запропонувати такі натурні експерименти. Для перевірки роботи алгоритмів просторової самоорганізації: утворення АМПА прямої лінії з подальшим рівновіддаленим розташуванням АМПА один від одного; утворення АМПА правильної геометричної фігури (трикутника, чотирикутника, кола і т.п.); утворення АМПА об'ємної геометричної фігури (наприклад, розташування АМПА у формі сфери); скупчення АМПА в обмеженій ділянці простору; перенесення АМПА утвореної фігури в паралельну площину; переміщення колективу АМПА за випадково обраним лідером. Складніші варіанти цих натурних експериментів передбачають керування в лабораторних умовах зміну параметрів водного середовища. У такий спосіб може бути перевірена здатність АМПА реагувати на ці зміни (наприклад, чи вдається АМПА утримати

сформовану ними геометричну фігуру за умов збільшенні швидкості течії). Для перевірки роботи алгоритмів параметричної самоорганізації: 1) в одній частині експериментального басейну змінюється прозорість води; перед колективом АМПА ставиться завдання оточити зону збурень за параметром прозорості; 2) вздовж експериментального басейну рухається джерело світла; перед колективом АМПА ставиться завдання оточити освітлену зону і рухатись разом з нею; 3) в експериментальному басейні розміщується труба з гарячою водою; перед колективом АМПА ставиться завдання виявити зону збурень за значенням температури та рівномірно розподілитись вздовж цієї зони (труби); 4) над однією частиною експериментального басейну створюється магнітне поле; перед колективом АМПА ставиться завдання переміщатись по басейну, уникаючи це поле. Зазначені натурні експерименти можуть бути змінені в плані заміни фізичних величин, які вимірюються сенсорними підсистемами АМПА, при цьому лишившись незмінними по суті.

Питання контролю за процесом проведення натурних експериментів та отримання контрольно-перевірковій інформації від АМПА може вирішуватись як за допомогою стандартних засобів безпроводного зв'язку з АМПА, так і за допомогою зовнішніх засобів реєстрації візуальної інформації. Крім цього, можна запропонувати використовувати з цією метою джерела світла, розташовані на корпусі АМПА та сітку світлоприймачів, розташовану на дні та стінах експериментального басейну. При цьому певні етапи виконання завдання АМПА відображає у конфігурації своїх джерел світла, що реєструється сіткою світлоприймачів і використовується в подальшій комп'ютерній обробці результатів експерименту.

### Висновки

Розглянуто проблему організації спільних узгоджених дій колективу автономних мобільних підводних апаратів. Розроблено узагальнений підхід до вирішення цієї проблеми, який дає змогу знаходити універсальні гарантовані розв'язки на вищому "організаційному" рівні прийняття рішень. За цим підходом вирішення проблеми організації узгоджених колективних дій АМПА можна шукати одночасно на двох рівнях: інфраструктурному рівні (розроблення службових алгоритмів колективної поведінки) та прикладному рівні (розроблення складних процедур колективної поведінки з використанням службових алгоритмів як "готових" складових елементів). Запропоновано також порядок застосування цього підходу та способи перевірки і тестування відповідних алгоритмів колективної поведінки АМПА.

1. Романовський Г.Ф., Блинцов В.С., Родин И.А., *Современное состояние и перспектива развития подводных аппаратов в Украине // Proceedings of the 5-th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System. Vol 2. Szczecin, 2004. – S.107–117.* 2. Блинцов В.С. *Современные проблемы создания электрооборудования и автоматизации подводных аппаратов // Радиоелектронні і комп'ютерні системи: Науково-технічний журнал. Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – 2007. – №5. – С. 90–98.* 3. <http://auvac.org/resources/browse/> 4. <http://navyauv.blogspot.com/> 5. <http://mit-avv-lab.blogspot.com/> 6. <http://www.i-cool.org/> 7. <http://www.princeton.edu/mae/research/controlsystems/> 8. Paley D., Zhang F., Leonard N., *Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System, IEEE Transactions On Control Systems Technology, April 30, 2006.* 9. Glotzbach T., Schneider M., Otto, P., *Team-Oriented Mission Planning (TOMP) for multiple marine vehicles: Planning of cooperative lawnmowers (Abstract) // Proceedings of the 4th International Conference on Computational Intelligence (CIRAS), Palmerston North/New Zealand November 2007.* 10. Steven G. Chappell et al., *Recent Field Experience with Multiple Cooperating Solar-Powered AUVs, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, NH, 2007.* 11. Golembo V.A., Kotlarov V.L., *Features of Construction of Measuring and Computing System for Research of Black Sea Basin // The Proc. Of international Conference "Black Sea'94", Varna Bulgaria, 1994, pp 3–4.* 12. Golembo, A. Bochkariov, A. Roudenko, E. Jorg, *Automatic Determination of Marine Water State Characteristics in Ecological Monitoring System // Proceedings, Fourth International Technical Conference on Ocean Engineering and Marine Technology "Black Sea'97", Varna, Bulgaria, 1997. – P.33–35.* 13. Golembo V., Kotlarov V., Botchkariov A. *Alternative technologies of the marine device engineering // Proc. of Oceanology International 98 "The Global Ocean", Volume 1, Brighton, England, 1998. – P.287–295.* 14. Бочкар'ов О.Ю., Голембо В.А. *Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2002. – № 463. – С.19–27.* 15. Мельник А.О., Голембо В.А.,

Бочкарьов О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С.100–107. 16. Бочкарьов А.Ю., Голембо В.А. Самоорганізація колектива мобільних измерительных агентів в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект. – Донецк, 2005. – №3. – С.723–731. 17. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Ціж А.М. Колективна поведінка мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2008. – № 630. – С. 31–35. 18. Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks, by Azzedine Boukerche (Editor), Wiley-IEEE Press (November 10, 2008). – 496 p.

УДК 621.39

І. Горбатий

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра телекомунікацій

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛІВ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ Й ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

© Горбатий І., 2009

Наведено метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) при використанні запропонованої амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС, *amplitude modulation of many components* – АММС). Досліджено залежність оптимального діаметра антени наземного інформаційного комплексу (НІК) ДЗЗ від швидкості передавання даних з бортового комплексу (БК) ДЗЗ TERRA при різних видах модуляції сигналу. За результатами моделювання встановлено, наскільки можливо зменшити діаметр антени НІК при використанні АММС порівняно з деякими відомими різновидами модуляції.

The method of rise the efficiency of telecommunication channels in the telecommunication systems and systems of remote sensing of Earth with use the proposed amplitude modulation of many components (AMMC) was given. The dependence of optimum antenna diameter of earth informative complex of remote sensing of Earth from the cosmic satellite TERRA data transmission speed using the varieties of signal modulation was explored. By the modelling results was set, how is possible to decrease the antenna diameter of earth informative complex with use the AMMC by comparison to some known varieties of modulation.

### Вступ

Основною задачею спектрально ефективних модуляцій є максимізація ефективності використання смуги частот. У системах ДЗЗ швидкість передавання даних лежить у діапазоні від 2 до 800 Мбіт/с, що накладає високі вимоги до приймального тракту, наприклад, необхідно встановлювати відповідну смугу пропускання каналу до демодулятора (детектора), а також на виході демодулятора (детектора) залежно від швидкості передавання даних (якщо смуга пропускання буде ширшою, то буде погіршуватись відношення сигнал/шум), нерівномірність амплітудно-частотної характеристики каналу повинна бути не більшою за 1 дБ, повинно бути ефективне автоматичне регулювання підсилення в каналі та інше. Тому для таких систем зв'язку і