



УКРАЇНА

(19) UA (11) 83201 (13) C2
(51) МПК (2006)
H04L 1/00
H04L 1/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ (ВАРІАНТИ) І ПРИСТРІЙ (ВАРІАНТИ) ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ТА СПОСІБ (ВАРІАНТИ) І ПРИСТРІЙ (ВАРІАНТИ) ДЛЯ ПРИЙОМУ ДАНИХ

1

(21) a200504935
(22) 24.10.2003
(86) PCT/US03/34519, 24.10.2003
(31) 10/693,429
(32) 23.10.2003
(33) US
(31) 60/421,309
(32) 25.10.2002
(33) US
(46) 25.06.2008, Бюл.№ 12, 2008 р.
(72) УОЛТОН ДЖЕЙ РОДНІ, КЕТЧУМ ДЖОН У.,
УОЛЛЕЙС МАРК, ГОВАРД СТІВЕН ДЖ.
(73) КВЕЛКОММ ІНКОРПОРЕЙТЕД
(56) US 6351499 B1, 26.02.2002
EP 1182799 A, 27.02.2002
EP 1185001 A, 06.03.2002
(57) 1. Спосіб передачі даних у безпроводній кому-
нікаційній системі з множинним доступом з
множиною входів і множиною виходів (MIMO), що
містить етапи, на яких:
вибирають щонайменше два користувальницькі
термінали для передачі даних;
вибирають режим направленої просторового
мультиплексування з множини режимів
просторового мультиплексування, один з яких є
режимом направленої просторового мульти-
плексування, підтримуваних системою, для
використання з щонайменше двома
користувальницькими терміналами;
вибирають швидкості для множини потоків даних,
призначених для передачі через множини
просторових каналів для щонайменше двох
користувальницьких терміналів; і
планують щонайменше два користувальницьких
термінали для передачі даних з вибраними
швидкостями і вибраним режимом просторового
мультиплексування.
2. Спосіб за п. 1, в якому один користувальницький
термінал вибирають для передачі даних і вибраний
режим просторового мультиплексування є
режимом направленої просторового мультиплек-
сування.
3. Спосіб за п. 2, що додатково містить етап, на
якому:
виконують просторову обробку множини потоків
даних з множиною напрямних векторів для пере-

2

дачі множини потоків даних по ортогональних про-
сторових каналах в один користувальницький тер-
мінал.
4. Спосіб за п. 1, в якому один користувальницький
термінал вибирають для передачі даних, і вибраний
режим просторового мультиплексування є
режимом ненаправленої просторового мульти-
плексування.
5. Спосіб за п. 4, що додатково містить етап, на
якому:
забезпечують множини потоків даних для передачі
через множини антен в один користувальницький
термінал.
6. Спосіб за п. 1, що додатково містить етап, на
якому:
виконують просторову обробку множини потоків
даних з множиною напрямних векторів для напра-
влення множини потоків даних до щонайменше
двох користувальницьких терміналів.
7. Спосіб за п. 1, що додатково містить етап, на
якому:
виконують просторову обробку у приймачі множи-
ни прийнятих потоків символів для одержання оці-
нок множини потоків даних, що передаються мно-
жиною користувальницьких терміналів, причому
кожний потік даних обробляють з відповідним на-
прямним вектором для направлення потоку даних.
8. Спосіб за п. 1, в якому для передачі даних ви-
бирають множини користувальницьких терміналів,
і вибраний режим просторового мультиплексуван-
ня є режимом ненаправленої просторового мульти-
плексування.
9. Спосіб за п. 8, що додатково містить етап, на
якому:
виконують просторову обробку у приймачі множи-
ни прийнятих потоків символів для одержання оці-
нок множини потоків даних, що передаються мно-
жиною користувальницьких терміналів.
10. Спосіб за п. 8, що додатково містить етап, на
якому:
забезпечують множини потоків даних для передачі
через множини антен у множини користувальниць-
ких терміналів, кожний з яких має множини антен.
11. Спосіб за п. 1, в якому MIMO система являє
собою систему дуплексного зв'язку з часовим роз-
діленням каналів (TDD).

(19) UA (11) 83201 (13) C2

12. Спосіб за п. 11, в якому вибраний режим просторового мультиплексування являє собою режим направленного просторового мультиплексування, якщо щонайменше калібрується один користувальницький термінал, і відгук низхідного каналу є взаємооберненим відгуку висхідного каналу.

13. Спосіб за п. 11, в якому вибраний режим просторового мультиплексування являє собою режим ненаправленного просторового мультиплексування, якщо щонайменше не калібрується один користувальницький термінал, і відгук низхідного каналу не є взаємооберненим відгуку висхідного каналу.

14. Спосіб за п. 1, в якому вибір множини швидкостей включає в себе:

оцінку співвідношень сигнал/шум-і-перешкоди (ССШ) множини просторових каналів; і вибір швидкостей, базуючись на оцінених ССШ множини просторових каналів.

15. Пристрій для передачі даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

пристрій вибору терміналів, виконаний з можливістю вибору щонайменше двох користувальницьких терміналів для передачі даних;

пристрій вибору швидкості, виконаний з можливістю вибору режиму направленного просторового мультиплексування з множини режимів просторового мультиплексування, один з яких є режимом направленного просторового мультиплексування, підтримуваних системою, для використання з щонайменше двома користувальницькими терміналами;

пристрій вибору швидкості, виконаний з можливістю вибору швидкостей для множини потоків даних, призначених для передачі через множинну просторових каналів каналу MIMO для щонайменше двох користувальницьких терміналів; і

планувальник, виконаний з можливістю планування щонайменше двох користувальницьких терміналів для передачі даних з вибраними швидкостями і вибраним режимом просторового мультиплексування.

16. Пристрій за п. 15, що додатково містить: передавальний просторовий процесор, виконаний з можливістю просторової обробки множини потоків даних згідно з вибраним режимом просторового мультиплексування для одержання множини потоків символів передачі для передачі через множинну антен у щонайменше два користувальницьких термінали.

17. Пристрій за п. 15, що додатково містить: приймальний просторовий процесор, виконаний з можливістю просторової обробки множини потоків прийнятих символів згідно з вибраним режимом просторового мультиплексування для одержання оцінок множини потоків даних, переданих щонайменше двома користувальницькими терміналами.

18. Пристрій для передачі даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

засіб вибору щонайменше двох користувальницьких терміналів для передачі даних;

засіб вибору режиму направленного просторового мультиплексування з множини режимів просторового мультиплексування, один з яких є режимом

направленного просторового мультиплексування, підтримуваних системою, для використання з щонайменше двома користувальницькими терміналами;

засіб вибору швидкостей для множини потоків даних, призначених для передачі через множинну просторових каналів каналу MIMO для щонайменше двох користувальницьких терміналів; і засіб планування щонайменше двох користувальницьких терміналів для передачі даних з вибраними швидкостями і вибраним режимом просторового мультиплексування.

19. Пристрій за п. 18, що додатково містить: засіб просторової обробки множини потоків даних згідно з вибраним режимом просторового мультиплексування для одержання множини потоків символів передачі для передачі через множинну антен у щонайменше один користувальницький термінал.

20. Пристрій за п. 18, що додатково містить: засіб просторової обробки множини потоків прийнятих символів відповідно до вибраного режиму просторового мультиплексування для одержання оцінок множини потоків даних, переданих щонайменше одним користувальницьким терміналом.

21. Спосіб прийому даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить етапи, на яких:

виконують просторову обробку в приймачі першої множини потоків прийнятих символів відповідно до першого режиму просторового мультиплексування для одержання першої множини потоків відновлених символів даних;

демодулюють і декодують першу множинну потоків відновлених символів даних відповідно до першої множини швидкостей для одержання першої множини потоків декодованих даних;

виконують просторову обробку у приймачі другої множини потоків прийнятих символів відповідно до другого режиму просторового мультиплексування для одержання другої множини потоків відновлених символів даних; і

демодулюють і декодують другу множинну потоків відновлених символів даних відповідно до другої множини швидкостей для одержання другої множини потоків декодованих даних.

22. Спосіб за п. 21, в якому перший режим просторового мультиплексування являє собою режим направленного просторового мультиплексування, і в якому виконують просторову обробку першої множини потоків прийнятих символів з множиною власних векторів для множини просторових каналів MIMO каналу для користувальницького терміналу.

23. Спосіб за п. 21, в якому другий режим просторового мультиплексування являє собою режим ненаправленного просторового мультиплексування.

24. Спосіб за п. 23, в якому друга множина потоків декодованих даних являє собою оцінки множини потоків даних, що передаються одним користувальницьким терміналом.

25. Спосіб за п. 23, в якому друга множина потоків декодованих даних являє собою оцінки множини потоків даних, що передаються одночасно множиною користувальницьких терміналів.

26. Спосіб за п. 23, в якому виконують просторову обробку другої множини потоків прийнятих символів, базуючись на способі інверсії кореляційної матриці каналу (CCMI).

27. Спосіб за п. 23, в якому виконують просторову обробку другої множини потоків прийнятих символів, базуючись на способі мінімальної середньої квадратичної помилки (MMSE).

28. Спосіб за п. 23, в якому виконують просторову обробку другої множини потоків прийнятих символів, базуючись на способі послідовного видалення перешкод (SIC).

29. Пристрій для прийому даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

приймальний просторовий процесор, виконаний з можливістю

виконання просторової обробки у приймачі першої множини потоків прийнятих символів відповідно до першого режиму просторового мультиплексування для одержання першої множини потоків відновлених символів даних; і

виконання просторової обробки у приймачі другої множини потоків прийнятих символів відповідно до другого режиму просторового мультиплексування для одержання другої множини потоків відновлених символів даних; і

приймальний процесор даних, виконаний з можливістю

демодулювання і декодування першої множини потоків відновлених символів даних відповідно до першої множини швидкостей для одержання першої множини потоків декодованих даних; і

демодулювання і декодування другої множини потоків відновлених символів даних відповідно до другої множини швидкостей для одержання другої множини потоків декодованих даних.

30. Спосіб передачі даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить етапи, на яких:

приймають інформацію, що вказує режим просторового мультиплексування і множинну швидкостей для використання для передачі даних, причому режим просторового мультиплексування вибирають з множини режимів просторового мультиплексування, підтримуваних системою, і, причому кожну з множини швидкостей вибирають з набору швидкостей, підтримуваного даною системою;

кодують і модулюють множинну потоків даних відповідно до множини швидкостей для одержання множини потоків символів даних; і виконують просторову обробку множини потоків символів даних відповідно до режиму просторового мультиплексування для одержання множини потоків символів передачі для передачі через множинну антен.

31. Спосіб за п. 30, в якому режим просторового мультиплексування являє собою режим направлено просторового мультиплексування, і, в якому виконують просторову обробку множини потоків символів даних з множиною напрямних векторів для передачі множини потоків символів даних по множині ортогональних просторових каналів MIMO каналу.

32. Спосіб за п. 31, що додатково містить етап, на якому:

передають направлений пілот-сигнал по кожному каналу з множини ортогональних просторових каналів.

33. Спосіб за п. 30, в якому режим просторового мультиплексування являє собою режим ненаправленого просторового мультиплексування, і в якому множинну потоків символів даних надають як множинну потоків символів передачі.

34. Спосіб за п. 30, що додатково містить етап, на якому: виконують калібрування таким чином, що відгук висхідного каналу є взаємооберненим відгуку низхідного каналу.

35. Пристрій для передачі даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

контролер, виконаний з можливістю прийому інформації, яка вказує режим просторового мультиплексування і множинну швидкостей для використання для передачі даних, причому режим просторового мультиплексування вибирають з множини режимів просторового мультиплексування, підтримуваних системою, і, причому кожну з множини швидкостей вибирають з набору швидкостей, підтримуваного даною системою;

передавальний процесор даних, виконаний з можливістю кодування і модулювання множини потоків даних відповідно до множини швидкостей для одержання множини потоків символів даних; і

передавальний просторовий процесор, виконаний з можливістю виконання просторової обробки множини потоків символів даних відповідно до режиму просторового мультиплексування для одержання множини потоків символів передачі для передачі через множинну антен.

36. Спосіб прийому даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить етапи, на яких:

приймають інформацію, що вказує режим направлено просторового мультиплексування і щонайменше одну швидкість для використання для передачі даних, причому режим направлено просторового мультиплексування вибирають з множини режимів просторового мультиплексування, один з яких є режимом направлено просторового мультиплексування, підтримуваних системою, і, причому кожну з щонайменше однієї швидкості вибирають з набору швидкостей, підтримуваного даною системою;

виконують просторову обробку щонайменше одного потоку прийнятих символів відповідно до режиму направлено просторового мультиплексування для одержання щонайменше одного потоку відновлених символів даних; і

демодулюють і декодують щонайменше один потік відновлених символів даних відповідно до щонайменше однієї швидкості для одержання щонайменше одного потоку декодованих даних.

37. Спосіб за п. 36, в якому один з множини режимів просторового мультиплексування являє собою режим ненаправлено просторового мультиплексування.

38. Спосіб за п. 37, в якому виконують просторову обробку множини потоків прийнятих символів, базуючись на способі інверсії кореляційної матриці каналу (CCMI), способі мінімальної середньої квадратичної помилки (MMSE) або способі послідовного видалення перешкод (SIC) для одержання множини потоків відновлених символів даних.

39. Спосіб за п. 37, в якому один потік прийнятих символів обробляють з оцінками посилення каналу для одержання одного потоку відновлених символів даних.

40. Пристрій для прийому даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

контролер, виконаний з можливістю прийому інформації, що вказує режим направлено просторового мультиплексування і щонайменше одну швидкість для використання для передачі даних, причому режим направлено просторового мультиплексування вибирають з множини режимів просторового мультиплексування, один з яких є режимом направлено просторового мультиплексування, підтримуваних системою, і, причому кожну з щонайменше однієї швидкості вибирають з набору швидкостей, підтримуваного даною системою;

приймальний просторовий процесор, виконаний з можливістю виконання просторової обробки щонайменше одного потоку прийнятих символів відповідно до режиму направлено просторового мультиплексування для одержання щонайменше одного потоку відновлених символів даних; і
приймальний процесор даних, виконаний з можливістю демодулювання і декодування щонайменше одного потоку відновлених символів даних відповідно до щонайменше однієї швидкості для одержання щонайменше одного потоку декодованих даних.

41. Пристрій для прийому даних у безпроводній комунікаційній системі з множинним доступом з

множиною входів і множиною виходів (MIMO), що містить:

засіб прийому інформації, що вказує режим направлено просторового мультиплексування і щонайменше одну швидкість для використання для передачі даних, причому режим направлено просторового мультиплексування вибирають з множини режимів просторового мультиплексування, один з яких є режимом направлено просторового мультиплексування, підтримуваних системою, при цьому кожну з щонайменше однієї швидкості вибирають з набору швидкостей, підтримуваного даною системою;

засіб просторової обробки щонайменше одного потоку прийнятих символів відповідно до режиму направлено просторового мультиплексування для одержання щонайменше одного потоку відновлених символів даних; і

засіб демодулювання і декодування щонайменше одного потоку відновлених символів даних відповідно до вказаної щонайменше однієї швидкості для одержання щонайменше одного потоку декодованих даних.

42. Пристрій за п. 41, в якому один з множини режимів просторового мультиплексування є режимом ненаправлено просторового мультиплексування.

43. Пристрій за п. 41, в якому засіб просторової обробки містить засіб просторової обробки, оснований на способі інверсії кореляційної матриці каналу (CCMI), способі мінімальної середньої квадратичної помилки (MMSE) або способі послідовного видалення перешкод (SIC) для одержання множини потоків відновлених символів даних.

44. Пристрій за п. 41, в якому засіб демодулювання і декодування містить засіб обробки щонайменше одного прийнятого потоку символів з оцінками посилення каналу для одержання одного потоку відновлених символів даних.

Дана заявка на патент вимагає пріоритету попередньої [заявки на патент США №60/421,309, що називається "MIMO WLAN System", подана 25 жовтня 2002р.], право на яку передане правонаступнику даного винаходу, і яка включена у даний опис у всій своїй повноті як посилання.

Даний винахід у загальному випадку * відноситься до зв'язку, і, більш конкретно, до комунікаційної системи з множиною входів і множиною виходів (MIMO).

MIMO система як правило використовує для передачі даних декілька (N_T) передавальних антен і декілька (N_R) приймальних антен, і позначається, як система (N_T, N_R). MIMO канал, сформований N_T передавальними і N_R приймальними антенами, може бути розкладений на N_S просторових каналів, де $N_S \leq \min\{N_T, N_R\}$. Для досягнення більшої загальної пропускної здатності, для передачі N_S незалежних потоків даних можуть використовуватися N_S просторових каналів. У загальному випадку, для одночасної передачі і відновлення декількох потоків даних, просторова обробка звичайно

виконується у приймачі і може виконуватися або не виконуватися у передавачі.

Відома MIMO система звичайно використовує визначену схему передачі для одночасної передачі декількох потоків даних. Ця схема передачі може бути вибрана на основі компромісу між різними факторами, такими як вимоги до системи, об'єм зворотного зв'язку з приймача у передавач, можливість передавача і приймача, і т.д. Передавач, приймач і система, до того ж, розроблені з можливістю підтримки вибраної схеми передачі і функціонування відповідно до неї. Вказана схема передачі звичайно має переважні ознаки, а також несприятливі ознаки, які можуть впливати на продуктивність системи.

Таким чином, у даній галузі техніки існує потреба у MIMO системі, виконаній з можливістю досягнення підвищеної ефективності.

Описана MIMO система, яка підтримує декілька режимів просторового мультиплексування (SM) для підвищення продуктивності і більшої гнучкості. Просторове мультиплексування відноситься до

одночасної передачі декількох потоків даних через декілька просторових каналів MIMO-каналу. Декілька режимів просторового мультиплексування можуть включати: (1) однокористувальницький направлений режим, при якому здійснюється передача декількох потоків даних по ортогональних просторових каналах в один приймач, (2) однокористувальницький ненаправлений режим, при якому здійснюється передача декількох потоків даних через декілька антен в один приймач без просторової обробки у передавачі, (3) багатокористувальницький направлений режим, при якому здійснюється одночасна передача декількох потоків даних у множину приймачів з просторовою обробкою у передавачі, і (4) багатокористувальницький ненаправлений режим, при якому здійснюється передача декількох потоків даних через декілька антен (сумісно розташованих або не сумісно розташованих) без просторової обробки у передавачі (передавачах) у приймач (приймачі), що має декілька антен.

Для передачі даних по низхідній і/або висхідній лінії вибирають набір щонайменше з одного користувальницького терміналу. Вибирають режим просторового мультиплексування для набору користувальницьких терміналів з множини режимів просторового мультиплексування, що підтримуються системою. Також вибирають множину швидкостей для множини потоків даних, призначених для передачі через множину просторових каналів каналу MIMO набору користувальницьких терміналів. Набір користувальницьких терміналів планують для передачі даних по низхідній і/або висхідній лінії з вибраними швидкостями і вибраним режимом просторового мультиплексування. Після цього множину потоків даних обробляють (наприклад, виконують кодування, перемежування і модулювання) відповідно до вибраних швидкостей і додатково піддають просторовій обробці відповідно до вибраного режиму просторового мультиплексування для передачі через множину просторових каналів.

Нижче більш детально описані різні аспекти, варіанти здійснення і відмітні ознаки винаходу.

На Фіг.1 показана MIMO система з множинним доступом;

На Фіг.2 показана структура кадру і каналу для MIMO системи;

На Фіг.3 показана точка доступу і два користувальницьких термінали у MIMO системі;

На Фіг.4 показаний передавальний (TX) процесор даних у точці доступу;

На Фіг.5 показаний TX просторовий процесор і модулятори у точці доступу;

На Фіг.6 показані демодулятори і приймальний (RX) просторовий процесор у багатоантенному користувальницькому терміналі;

На Фіг.7 показаний RX процесор даних у багатоантенному користувальницькому терміналі;

На Фіг.8 показаний RX просторовий процесор і RX процесор даних, які реалізують спосіб послідовного видалення перешкод (SIC);

На Фіг.9 показані приймальні/передавальні ланцюги у точці доступу і користувальницькому терміналі;

На Фіг.10 показаний механізм керування швидкістю передачі із замкнутим контуром керування;

На Фіг.11 показаний контролер і планувальник для планування користувальницьких терміналів;

На Фіг.12 показаний процес планування користувальницьких терміналів для передачі даних;

На Фіг.13 показаний процес передачі даних по низхідній лінії; і

На Фіг.14 показаний процес прийому даних по висхідній лінії.

Використовуване у даному описі слово "ілюстративний" означає "такий, що служить як приклад, ілюстрація". Будь-який варіант здійснення, викладений у даному описі як "ілюстративний", не потрібно розглядати як переважний або такий, що має переваги над іншими варіантами здійснення.

MIMO система може використовувати одну несучу або множину несучих для передачі даних. Множина несучих може застосовуватися у мультиплексуванні з ортогональним розділенням частот (OFDM), в інших способах модулювання з множиною несучих або в інших системах. OFDM ефективно розділяє смугу частот системи на множину (N_F) ортогональних піддіапазонів, які звичайно називаються тонами, бінами, несучими і частотними каналами. У випадку OFDM кожний піддіапазон зв'язаний з відповідною несучою, яка може бути модульована даними. Наведений нижче опис поданий для MIMO системи, яка використовує OFDM. Проте концепції, викладені у даному описі, у рівній мірі застосовні до MIMO системи з однією несучою.

MIMO система підтримує множину режимів просторового мультиплексування для збільшення продуктивності і більшої гнучкості. У Таблиці 1 перераховані підтримувані режими просторового мультиплексування і наведені їх короткі описи.

Таблиця 1

Режим просторового мультиплексування	Опис
Однокористувальницький направлений	Множину потоків даних передають по ортогональних просторових каналах в один приймач
Однокористувальницький ненаправлений	Множину потоків даних передають через множину антен в один приймач без просторової обробки у передавачі
Багатокористувальницький направлений	Множину потоків даних передають одночасно (1) з одного передавача у множину приймачів або (2) з множини передавачів в один приймач, в обох випадках з просторовою обробкою у передавачі (передавачах)
Багатокористувальницький ненаправлений	Множину потоків даних передають одночасно (1) з множини передавачів в один приймач або (2) з одного передавача у множину приймачів, в обох випадках без просторової обробки у передавачі (передавачах)

MIMO система також може підтримувати інші і/або різні режими просторового мультиплексування, і це знаходиться у межах об'єму даного винаходу.

Кожний режим просторового мультиплексування має різні калібрування і вимоги. Режимми направлено просторового мультиплексування як правило дозволяють досягти кращої продуктивності, але можуть застосовуватися тільки якщо передавач має достатню інформацію про стан каналу для ортогоналізації просторових каналів за допомогою розкладання або якого-небудь іншого способу, як описано нижче. У випадку режимів ненаправлено просторового мультиплексування потрібно дуже мало інформації для одночасної передачі множини потоків даних, але продуктив-

ність може бути не такою високою, як у випадку режимів направлено просторового мультиплексування. Відповідний режим просторового мультиплексування може бути вибраний для використання в залежності від доступної інформації про стан каналу, від можливостей передавача і приймача, системних вимог і т.д. Кожний з режимів просторового мультиплексування описаний нижче.

1. Однокористувальницький режим направлено просторового мультиплексування

Частотно-селективний МІМО канал, сформований N_T передавальними антенами і N_R приймальними антенами, може бути охарактеризований N_F матрицями відгуків каналу у частотному домені, $\underline{H}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, кожна з яких має розмірність $N_R \times N_T$.

Матриця відгуків каналу для кожного піддіапазону може бути виражена як:

$$\underline{H}(k) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(k) & h_{1,2}(k) & \dots & h_{1,N_T}(k) \\ h_{2,1}(k) & h_{2,2}(k) & \dots & h_{2,N_T}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(k) & h_{N_R,2}(k) & \dots & h_{N_R,N_T}(k) \end{bmatrix}, \text{ рівняння (1)}$$

де елемент $h_{ij}(k)$, для $i=1 \dots N_R, j=1 \dots N_T$ і $k=1 \dots N_F$ являє собою зв'язок (тобто комплексне посилення) між передавальною антеною j і приймальною антеною i для піддіапазону k .

Матриця $\underline{H}(k)$ відгуку каналу для кожного піддіапазону може бути "діагоналізована" для одержання N_S власних мод для цього піддіапазону. Така діагоналізація може бути проведена шляхом виконання або розкладання по сингулярних значеннях матриці $\underline{H}(k)$ відгуку каналу, або розкладання по власних векторах кореляційної матриці для матриці $\underline{H}(k)$, яка являє собою $\underline{R}(k) = \underline{H}^H(k) \underline{H}(k)$, де " H " означає транспонування з комплексним спряженням.

Розкладання по сингулярних значеннях матриці $\underline{H}(k)$ відгуків каналу для кожного піддіапазону може бути виражене як:

$$\underline{H}(k) = \underline{U}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}^H(k) \quad \text{рівняння (2)}$$

де $\underline{U}(k)$ являє собою $(N_R \times N_R)$ унітарну матрицю лівих власних векторів для $\underline{H}(k)$;

$\underline{\Sigma}(k)$ являє собою $(N_R \times N_T)$ діагональну матрицю сингулярних значень для $\underline{H}(k)$;

$\underline{V}(k)$ являє собою $(N_T \times N_T)$ унітарну матрицю правих власних векторів для $\underline{H}(k)$;

Унітарність матриці \underline{M} характеризується властивістю $\underline{M}^H \underline{M} = \underline{I}$, де \underline{I} являє собою одиничну матрицю.

Розкладання по власних векторах кореляційної матриці $\underline{H}(k)$ для кожного піддіапазону може бути виражене як:

$$\underline{R}(k) = \underline{H}^H(k) \underline{H}(k) = \underline{V}(k) \underline{\Delta}(k) \underline{V}^H(k) \quad \text{рівняння (3)}$$

де $\underline{\Delta}(k)$ являє собою $(N_T \times N_T)$ діагональну матрицю власних векторів для $\underline{R}(k)$. Як показано у

рівняннях (2) і (3), стовпці $\underline{V}(k)$ є власними векторами для $\underline{R}(k)$, а також правими власними векторами для $\underline{H}(k)$.

Розкладання по сингулярних значеннях і розкладання по власних векторах описане [Gilbert Strang у книзі озаглавленій "Linear Algebra and Its Applications", друге видання, Academic Press, 1980]. Однокористувальницький режим направлено просторового мультиплексування реалізований або за допомогою розкладання по сингулярних значеннях, або за допомогою розкладання по власних векторах. Для простоти у наведеному нижче описі використовується розкладання по сингулярних значеннях.

Праві власні вектори для $\underline{H}(k)$ також називаються "напрямними" векторами і можуть бути використані передавачем для просторової обробки при передачі даних по N_S власних модах для $\underline{H}(k)$. Ліві власні вектори для $\underline{H}(k)$ можуть бути використані для просторової обробки у приймачі для відновлення даних, переданих по N_S власних модах. Власні моди можна розглядати як ортогональні просторові канали, одержувані у результаті розкладання. Діагональна матриця $\underline{\Sigma}(k)$ містить невід'ємне дійсне значення по діагоналі і нулі в інших позиціях. Вказані діагональні елементи називаються сингулярними значеннями для $\underline{H}(k)$ і являють собою посилення каналу для N_S власних мод $\underline{H}(k)$. Сингулярні значення для $\underline{H}(k)$ $\{\sigma_1(k) \sigma_2(k) \dots \sigma_N(k)\}$, також являють собою корінь квадратний з власних значень для $\underline{R}(k)$, $\{\lambda_1(k) \lambda_2(k) \dots \lambda_{N_S}(k)\}$, де $\sigma_i(k) = \sqrt{\lambda_i(k)}$. Декомпозиція по сингулярних значеннях може виконуватися для матриці $\underline{H}(k)$ відгуку каналу незалежно для кожного з N_F піддіапазонів для визначення N_S власних мод для цього піддіапазону. Для кожного піддіапазону сингулярні значення у матриці $\underline{\Sigma}(k)$ можуть бути впорядковані від більших до менших і власні вектори у матрицях $\underline{V}(k)$ і $\underline{U}(k)$ можуть бути впорядковані відповідним чином. "Широкосмугова" власна мода може бути визначена як набір власних мод для всіх N_F піддіапазонів, після упорядкування (тобто широкосмугова власна мода m включає власні моди m всіх піддіапазонів). У загальному випадку, для передачі можуть використовуватися всі N_F піддіапазони або менша кількість, причому невикористовувані піддіапазони заповнюються сигналами з нульовим значенням. Для простоти, у наведеному нижче описі припускається, що всі N_F піддіапазони використовуються для передачі.

В однокористувальницькому режимі направлено просторового мультиплексування (або просто "однокористувальницький направлений режим") передають N_S потоків символів даних по N_S власних модах МІМО каналу. Це потребує просторової обробки як у передавачі, так і у приймачі.

Просторова обробка у передавачі для кожного піддіапазону у випадку однокористувальницького направлено режиму може бути виражена як:

$$\underline{x}_{su-s}(k) = \underline{V}(k) \underline{s}(k) \quad \text{рівняння (4)}$$

де $\underline{s}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор з N_S ненульовими елементами для N_S символів даних, при-

значених для передачі по N_S власних модах піддіапазону k ; і

$\underline{x}_{su-s}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор з N_T елементами для N_T символів передачі, призначених для передачі через N_T передавальних антен у піддіапазоні k .

N_S елементів $\underline{s}(k)$ можуть являти собою N_S потоків символів даних, а елементи $\underline{s}(k)$, що залишилися, якщо вони є, заповнюють нулями.

Прийняті символи, одержані приймачем для кожного піддіапазону можуть бути виражені як:

$$\underline{r}_{su-s} = \underline{H}(k) \underline{x}_{su-s}(k) + \underline{n}(k) = \underline{H}(k) \underline{V}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k) \quad \text{рівняння (5)}$$

де $\underline{r}_{su-s}(k)$ являє собою $(N_R \times 1)$ вектор з N_R елементами для N_R прийнятих символів, одержаних через N_R приймальних антен для піддіапазону k ; і $\underline{n}(k)$ являє собою вектор шуму для піддіапазону k .

Просторова обробка у приймачі для відновлення вектора $\underline{s}(k)$ для кожного піддіапазону може бути виражена як:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}}_{su-s}(k) &= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) \underline{r}_{su-s}(k), \\ &= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) (\underline{H}(k) \underline{V}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)), \quad \text{рівняння (6)} \\ &= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) (\underline{U}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}^H(k) \underline{V}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)), \\ &= \underline{s}(k) + \underline{\hat{n}}_{su-s}(k), \end{aligned}$$

$$\text{або} \quad \tilde{\underline{s}}_{su-s}(k) = \underline{U}^H(k) \underline{r}_{su-s}(k) \quad i$$

$$\hat{\underline{s}}_{su-s}(k) = \underline{\Sigma}^{-1}(k) \tilde{\underline{s}}_{su-s}(k)$$

де $\tilde{\underline{s}}_{su-s}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор з N_S детектованими символами даних для піддіапазону k ;

$\hat{\underline{s}}_{su-s}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор з N_S відновленими символами даних для піддіапазону k ; і

$\underline{n}_{su-s}(k)$ являє собою вектор шуму після обробки для піддіапазону k .

$\tilde{\underline{s}}_{su-s}(k)$ являє собою ненормовану оцінку вектора $\underline{s}(k)$ даних, а вектор $\hat{\underline{s}}_{su-s}(k)$ являє собою нормовану оцінку $\underline{s}(k)$. Множення на $\underline{\Sigma}^{-1}(k)$ у рівнянні (6) враховує (можливо, різні) посилення N_S просторових каналів і нормує результат просторової обробки у приймачі таким чином, що у наступний блок обробки надаються відновлені символи даних, що мають відповідну величину.

Для однокористувальницького направленої режиму матриця $\underline{E}_{su-s}(k)$ напрямних векторів, використовується у передавачі для кожного піддіапазону, може бути виражена як:

$$\underline{E}_{su-s}(k) = \underline{V}(k) \quad \text{рівняння (7)}$$

Матриця просторової фільтрації, використовується у приймачі для кожного піддіапазону, може бути виражена як:

$$\underline{M}_{su-s}(k) = \underline{U}^H(k) \quad \text{рівняння (8)}$$

Однокористувальницький направлений режим може бути використаний, якщо передавач має

інформацію про стан каналу або у вигляді матриці $\underline{H}(k)$ відгуку каналу, або матриці $\underline{V}(k)$ правих власних векторів для $\underline{H}(k)$, для $k=1 \dots N_F$. Передавач може оцінити $\underline{H}(k)$ або $\underline{V}(k)$ для кожного піддіапазону, базуючись на пілот-сигналі, що передається приймачем, як описано нижче, або може одержати цю інформацію від приймача по каналу зворотного зв'язку. Як правило, приймач може одержати $\underline{H}(k)$ або $\underline{U}^H(k)$ для кожного піддіапазону, базуючись на пілот-сигналі, що передається передавачем. З рівняння (6) видно, що N_S потоків $\underline{s}(k)$ символів даних, спотворених тільки шумом $\underline{n}_{su-s}(k)$ каналу після обробки, можуть бути одержані у випадку однокористувальницького направленої режиму за допомогою відповідної просторової обробки як у передавачі, так і у приймачі.

Співвідношення сигнал/шум-і-перешкоди (ССШ) для

однокористувальницького направленої режиму може бути виражене як:

$$\gamma_{su-s,m}(k) = \frac{P_m(k) \lambda_m(k)}{\sigma^2}, m = 1 \dots N_S \quad \text{рівняння (9)}$$

де $P_m(k)$ являє собою потужність передачі, що використовується для символу даних, переданого у піддіапазоні k ширококутової власної моди m ;

$\lambda_m(k)$ являє собою власне значення для піддіапазону k ширококутової власної моди m , яке є m -им діагональним елементом для $\underline{\Delta}(k)$; і

$\gamma_{su-s,m}(k)$ являє собою ССШ для піддіапазону k ширококутової власної моди m .

2. Однокористувальницький режим ненаправленого просторового мультиплексування

Однокористувальницький режим ненаправленого просторового мультиплексування (або просто "однокористувальницький ненаправлений режим") може бути використаний, якщо передавач не має достатньо інформації про стан каналу, або однокористувальницький направлений режим не підтримується з яких-небудь інших причин. У випадку однокористувальницького ненаправленого режиму передають N_S потоків символів даних через N_T передавальних антен без якої-небудь просторової обробки у передавачі.

У випадку однокористувальницького ненаправленого режиму матриця $\underline{E}_{ns}(k)$ напрямних векторів, використовується у передавачі для кожного піддіапазону, може бути виражена як:

$$\underline{E}_{ns}(k) = \underline{I} \quad \text{рівняння (10)}$$

Просторова обробка у передавачі для кожного піддіапазону може бути, виражена як:

$$\underline{x}_{ns}(k) = \underline{s}(k) \quad \text{рівняння (11)}$$

де $\underline{x}_{ns}(k)$ являє собою вектор символів передачі для однокористувальницького ненаправленого режиму. "Ширококутовий" просторовий канал для цього режиму може бути визначений як просторовий канал, який відповідає даній передавальній антені (тобто ширококутовий просторовий канал m для однокористувальницького ненаправленого

режиму включає в себе всі піддіапазони передавальної антени т).

Прийняті символи, одержані приймачем для кожного піддіапазону можуть бути виражені як:

$$\mathbf{r}_{ns}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_{ns}(k) + \mathbf{n}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad \text{рівняння (12)}$$

Приймач може відновити вектор $\mathbf{s}(k)$ даних, використовуючи різні способи обробки, такі як спосіб інверсії кореляційної матриці каналу (CCMI) (який також відомий як спосіб "перетворення на нуль незначимих коефіцієнтів"), спосіб мінімальної середньої квадратичної помилки (MMSE), коректор з вирішальним зворотним зв'язком (DFE) і спосіб послідовного видалення перешкод (SIC) і т.д.

А. Просторова обробка CCMI

Приймач може використовувати спосіб CCMI для виділення потоків символів даних. CCMI приймач використовує просторовий фільтр, що має відгук $\mathbf{M}_{ccmi}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, який може бути виражений як:

$$\mathbf{M}_{ccmi}(k) = [\mathbf{H}^H(k)\mathbf{H}(k)]^{-1}\mathbf{H}(k) = \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{H}(k) \quad \text{рівняння (13)}$$

Просторова обробка у CCMI приймачі у випадку однокористувальницького ненаправленого режиму може бути виражена як:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}_{ccmi} &= \mathbf{M}_{ccmi}(k)\mathbf{r}_{ns}(k) \\ &= \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{H}^H(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)) \quad \text{рівняння (14)} \\ &= \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{ccmi}(k) \end{aligned}$$

де $\tilde{\mathbf{s}}_{ccmi}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор з N_S відновлених символів даних для піддіапазону k ; $\mathbf{n}_{ccmi}(k) = \mathbf{M}_{ccmi}(k)\mathbf{n}(k)$ являє собою шум після CCMI фільтрації для піддіапазону k .

Аутоковаріаційна матриця $\mathbf{Q}_{ccmi}(k)$ шуму після CCMI фільтрації для кожного піддіапазону може бути виражена як:

$$\min_{(\mathbf{M}_{mmse}(k))} = E[(\mathbf{M}_{mmse}(k)\mathbf{r}_{ns}(k) - \mathbf{s}(k))^H(\mathbf{M}_{mmse}(k)\mathbf{r}_{ns}(k) - \mathbf{s}(k))] \quad \text{рівняння (17)}$$

Рішення задачі оптимізації, описаної рівнянням (17), може бути одержане різними способами. В одному з ілюстративних способів матриця $\mathbf{M}_{mmse}(k)$ MMSE просторового фільтра для кожного піддіапазону може бути виражена як:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{mmse}(k) &= \mathbf{H}^H(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{H}^H(k) + \mathbf{Q}_{nn}(k)]^{-1} \\ &= \mathbf{H}^H(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{H}^H(k) + \sigma^2\mathbf{I}]^{-1} \quad \text{рівняння (18)} \end{aligned}$$

У другій рівності рівняння (18) припускається, що вектор $\mathbf{n}(k)$ шуму являє собою AWGN з нульовим середнім і дисперсією σ^2 .

Просторова обробка у MMSE приймачі у випадку однокористувальницького ненаправленого режиму складається з двох етапів. На першому етапі MMSE приймач множить вектор $\mathbf{r}_{ns}(k)$ для N_R потоків прийнятих символів на матрицю $\mathbf{M}_{mmse}(k)$ MMSE просторового фільтра для одержання век-

$$\begin{aligned} \varphi_{ccmi}(k) &= E[\mathbf{r}_{ccmi}(k)\mathbf{r}_{ccvi}^H(k)] \\ &= \mathbf{M}_{ccmi}(k)\mathbf{Q}_{nn}(k)\mathbf{M}_{ccvi}^H(k) \quad \text{рівняння (15)} \\ &= \sigma^2\mathbf{R}^{-1}(k) \end{aligned}$$

де $E[x]$ являє собою математичне очікування для x . В останній рівності рівняння (15) припускається, що шум $\mathbf{n}(k)$ являє собою адитивний білий Гауссівський шум (AWGN) з нульовим середнім, дисперсією σ^2 і аутоковаріаційною матрицею $\mathbf{Q}_{ccmi}(k) = E[\mathbf{r}_{ccmi}(k)\mathbf{r}_{ccmi}^H(k)] = \sigma^2\mathbf{I}$. У цьому випадку CCШ для CCMI приймача може бути виражене як:

$$\gamma_{ccmi,m}(k) = \frac{P_m(k)}{r_{mm}(k)\sigma^2}, m = 1 \dots N_S \quad \text{рівняння (16)}$$

де $P_m(k)$ являє собою потужність передачі, використовувану для символу даних, переданого у піддіапазоні k широкосмугового просторового каналу m ;

$r_{mm}(k)$ являє собою m -й діагональний елемент $\mathbf{R}(k)$ для піддіапазону k ;

$\gamma_{ccmi,m}(k)$ являє собою CCШ для піддіапазону k широкосмугового просторового каналу m .

Через структуру $\mathbf{R}(k)$ спосіб CCMI може посилювати шум.

В. Просторова обробка MMSE

Приймач може використовувати MMSE для придушення перехресних перешкод між потоками символів даних і максимізувати CCШ відновлених потоків символів даних. MMSE приймач використовує просторовий фільтр, що має відгук матриці $\mathbf{M}_{mmse}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, яку виводять таким чином, що середньоквадратична помилка між оціненим вектором даних з просторового фільтра і вектором $\mathbf{s}(k)$ даних мінімізована. MMSE критерій може бути виражений як:

тора $\tilde{\mathbf{s}}_{mmse}(k)$ для N_S потоків детектованих символів наступним чином:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}_{mmse} &= \mathbf{M}_{mmse}(k)\mathbf{r}_{ns}(k) \\ &= \mathbf{M}_{mmse}(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)) \quad \text{рівняння (19)} \\ &= \mathbf{Q}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{mmse}(k) \end{aligned}$$

де $\mathbf{n}_{mmse}(k) = \mathbf{M}_{mmse}(k)\mathbf{n}(k)$ являє собою шум після MMSE фільтрації, і $\mathbf{Q}(k) = \mathbf{M}_{mmse}(k)\mathbf{H}(k)$. N_S потоків детектованих символів є ненормованими оцінками N_S потоків символів даних.

На другому етапі MMSE приймач множить вектор $\tilde{\mathbf{s}}_{mmse}$ на масштабуючу матрицю $\mathbf{D}_{mmse}^{-1}(k)$ для одержання вектора $\hat{\mathbf{s}}_{mmse}(k)$ для N_S потоків відновлених символів даних, наступним чином:

$$\hat{\mathbf{s}}_{mmse}(k) = \mathbf{D}_{mmse}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{s}}_{mmse}(k) \quad \text{рівняння (20)}$$

де $\underline{D}_{mmse}(k)$ являє собою діагональну матрицю, чий діагональні елементи є діагональними елементами $\underline{Q}(k)$, тобто, $\underline{D}_{mmse}(k) = \text{diag}[\underline{Q}(k)]$. N_S потоків відновлених символів даних є нормованими оцінками N_S потоків символів даних.

Використовуючи визначення оберненої матриці, матриця $\underline{Q}(k)$ може бути представлена наступним чином:

$$\underline{Q}(k) = \underline{H}^H(k) \underline{p}_m^{-1}(k) \underline{H}(k) [\underline{H}^H(k) \underline{p}_m^{-1}(k) \underline{H}(k) + I]^{-1} \quad \text{рівняння (21)}$$

$$= \underline{H}^H(k) \underline{H}(k) [\underline{H}^H(k) \underline{H}(k) + \sigma^2 I]^{-1}$$

У другій рівності рівняння (21) припускається, що шум являє собою AWGN з нульовим середнім і дисперсією σ^2 .

ССШ для MMSE приймача може бути виражене як:

$$\gamma_{mmse,m}(k) = \frac{q_{mm}(k)}{1 - q_{mm}(k)}, m = 1 \dots N_S \quad \text{рівняння (22)}$$

де $q_{mm}(k)$ являє собою m -й діагональний елемент $\underline{Q}(k)$ для піддіапазону k ; i^*

$\gamma_{mmse,m}(k)$ являє собою ССШ для піддіапазону k для широкопasmового просторового каналу m .

С. Обробка у приймачі при послідовному видаленні перешкод Приймач може обробляти N_R потоків прийнятих символів, використовуючи спосіб SIC для відновлення N_S потоків символів даних. У випадку способу SIC приймач спочатку виконує просторову обробку N_R потоків прийнятих символів (наприклад, використовуючи ССМІ, MMSE або який-небудь інший спосіб) і одержує один потік відновлених символів даних. Приймач виконує додаткову обробку (наприклад, виконує демодулювання, обернене перемешування і декодування) потоку відновлених символів даних для одержання потоку декодованих даних. Потім приймач оцінює перешкоду, яку цей потік створює для інших $N_S - 1$ потоків символів даних і видаляє оцінену перешкоду з N_R потоків прийнятих символів для одержання N_R потоків модифікованих символів. Потім приймач повторює таку ж обробку для N_R потоків модифікованих символів для відновлення іншого потоку символів даних.

Для SIC приймача потоки вхідних (тобто прийнятих або модифікованих) символів для етапу l , де $l = 1 \dots N_S$, можуть бути виражені як:

$$\underline{r}_{sic}^l(k) = \underline{H}^l(k) \underline{x}_{ns}^l(k) + \underline{n}(k) = \underline{H}^l(k) \underline{s}^l(k) + \underline{n}(k) \quad \text{рівняння (23)}$$

де $\underline{r}_{sic}^l(k)$ являє собою вектор N_R модифікованих символів для піддіапазону k на етапі l , і

$\underline{r}_{sic}^1(k) = \underline{r}_{ns}(k)$ для першого етапу;
 $\underline{s}^l(k)$ являє собою вектор $(N_T - l + 1)$ символів даних, ще не відновлених, для піддіапазону k на етапі l ; і

$\underline{H}^l(k)$ являє собою $N_R \times (N_T - l + 1)$ редуковану матрицю відгуку каналу для піддіапазону k на етапі l .

У рівнянні (23) припускається, що потоки символів даних, відновлені на попередніх $(l-1)$ етапах видалені. Розмірність матриці $\underline{H}(k)$ відгуку каналу

послідовно редукується на один стовпець для кожного при відновленні і видаленні потоку символів даних. Для етапу l редуковану матрицю $\underline{H}^l(k)$ відгуку каналу одержують шляхом видалення $(l-1)$ з вихідної матриці $\underline{H}(k)$, відповідних $(l-1)$ потокам заздалегідь відновлених символів даних, тобто, $\underline{H}^l(k) = [\underline{h}_{j1}(k) \underline{h}_{j2}(k) \dots \underline{h}_{j_{N_T-l+1}}(k)]$, де $\underline{h}_{jn}(k)$ являє собою $N_R \times 1$ вектор відгуку каналу між передавальною антеною j_n і N_R приймальними антенами. Для етапу l , $(l-1)$ потокам символів даних, відновлених на попередніх етапах, присвоюють індекси $\{j_1 j_2 \dots j_{l-1}\}$, і $(N_T - l + 1)$ потокам символів даних, ще не відновлених, присвоюють індекси $\{j_l j_{l+1} \dots j_{N_T}\}$.

Для етапу l SIC приймач виводить матрицю $\underline{M}_{sic}^l(k)$ просторової фільтрації, для $k = 1 \dots N_F$, базуючись на редукованій матриці $\underline{H}^l(k)$ відгуку каналу (замість вихідної матриці $\underline{H}(k)$), використовуючи спосіб ССМІ, як показано у рівнянні (13), спосіб MMSE, як показано у рівнянні (18) або який-небудь інший спосіб. Матриця $\underline{M}_{sic}^l(k)$ має розмірність $(N_T - l + 1) \times N_R$. Оскільки $\underline{H}^l(k)$ є різною для кожного етапу, матриця $\underline{M}_{sic}^l(k)$ просторової фільтрації також є різною для кожного етапу.

SIC приймач множить вектор $\underline{r}_{sic}^l(k)$ для N_R потоків модифікованих символів на матрицю $\underline{M}_{sic}^l(k)$ просторової фільтрації для одержання вектора $\underline{\tilde{s}}_{sic}^l(k)$ для $(N_T - l + 1)$ потоків детектованих символів наступним чином:

$$\begin{aligned} \underline{\tilde{s}}_{sic}^l(k) &= \underline{M}_{sic}^l(k) \underline{r}_{sic}^l(k) \\ &= \underline{M}_{sic}^l(k) (\underline{H}^l(k) \underline{s}^l(k) + \underline{n}^l(k)) \\ &= \underline{Q}_{sic}^l(k) \underline{s}^l(k) + \underline{n}^l(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (24)}$$

де $\underline{n}^l(k) = \underline{M}_{sic}^l(k) \underline{n}^l(k)$ являє собою шум після фільтрації для піддіапазону k на етапі l , $\underline{n}^l(k)$ являє собою редукований вектор $\underline{n}(k)$, і $\underline{Q}_{sic}^l(k) = \underline{M}_{sic}^l(k) \underline{H}^l(k)$. Потім SIC приймач вибирає один з потоків детектованих символів для відновлення. Оскільки на кожному етапі відновлюють тільки один потік символів даних, SIC приймач може просто вивести один $(1 \times N_R)$ вектор-рядок $\underline{m}_{ji}^l(k)$ просторової фільтрації для потоку $\{s_{ji}\}$ символів даних, призначених для відновлення на етапі l . Вектор-рядок $\underline{m}_{ji}^l(k)$ являє собою один рядок матриці $\underline{M}_{sic}^l(k)$. У цьому випадку просторова обробка для етапу l для відновлення потоку $\{s_{ji}\}$ символів даних може бути виражена як:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{ji}^l(k) &= \underline{m}_{ji}^l(k) \underline{r}_{sic}^l(k) = \\ &= \underline{q}_{ji}^l(k) \underline{s}^l(k) + \underline{m}_{ji}^l(k) \underline{n}(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (25)}$$

де $\underline{q}_{ji}^l(k)$ являє собою рядок $\underline{Q}_{sic}^l(k)$, що відповідає потоку $\{s_{ji}\}$ символів даних.

У будь-якому випадку приймач виконує масштабування потоку $\{\tilde{s}_{ji}^l\}$ детектованих символів для одержання потоку $\{\hat{s}_{ji}^l\}$ відновлених символів даних і виконує додаткову обробку (наприклад, виконує демодулювання, обернене перемешування і декодування) потоку $\{\hat{s}_{ji}^l\}$ для одержання потоку $\{\hat{d}_{ji}^l\}$ декодованих даних. Приймач також формує

оцінку перешкоди, яку цей потік, створює для інших потоків символів даних, ще не відновлених. Для оцінки перешкоди приймач виконує повторне кодування, перемешування і відображення символів потоку $\{\hat{d}_{ji}\}$ декодованих даних таким же способом, який виконується у передавачі і одержує потік $\{\hat{s}_{ji}\}$ "повторно модульованих" символів, який являє собою оцінку тільки що відновленого потоку символів даних. Потім приймач виконує згортку потоку повторно модульованих символів з кожним з N_R елементів у векторі $\underline{h}_j(k)$ відгуку каналу для потоку $\{s_{ji}\}$ для одержання N_R компонентів $\hat{i}_{ji}(k)$ перешкоди, що створюється цим потоком. Потім N_R компонентів перешкоди віднімають з N_R потоків $\hat{r}_{sic}^l(k)$ модифікованих символів для етапу l для одержання N_R потоків $\hat{r}_{sic}^{l+1}(k)$ для наступного етапу $l+1$, тобто, $\hat{r}_{sic}^{l+1}(k) = \hat{r}_{sic}^l(k) - \hat{i}_{ji}(k)$. Потоки $\hat{r}_{sic}^l(k)$ модифікованих символів являють собою потоки, які були б прийняті, якщо б потік $\{s_{ji}\}$ символів даних не передавався (тобто, припускається, що видалення перешкоди було виконане ефективно).

SIC приймач обробляє N_R потоків прийнятих символів на N_S послідовних етапах. Для кожного етапу SIC приймач (1) виконує просторову обробку або N_R потоків прийнятих символів, або N_R потоків модифікованих символів з попереднього етапу для одержання одного потоку відновлених символів даних, (2) декодує цей потік відновлених символів даних для одержання відповідного потоку декодованих даних, (3) виконує оцінку і видаляє перешкоду, пов'язану з цим потоком, і (4) одержує N_R потоків модифікованих символів для наступного етапу. У випадку, якщо перешкода, пов'язана з кожним потоком даних, може бути точно оцінена і видалена, то пізніше відновлені потоки даних у меншій мірі схильні до впливу перешкод і можуть мати вище ССШ.

У випадку способу SIC ССШ кожного потоку відновлених символів даних залежить від (1) способу просторової обробки (наприклад, ССМІ або ММСЕ), використовуюваного на кожному етапі, (2) конкретного етапу, на якому відновлюють даний потік символів даних, і (3) величини перешкоди, пов'язаної з потоками символів даних, відновлених на більш ранніх етапах. ССШ для SIC приймача з ССМІ може бути виражене як:

$$\gamma_{sic-ccmim}(k) = \frac{P_m(k)}{r_{mm}^l(k)\sigma^2}, \quad \text{рівняння (26)}$$

$$m = 1 \dots N_s$$

де $\hat{r}_{mm}^l(k)$ являє собою m -й діагональний елемент $[\hat{R}^l(k)]^{-1}$ для піддіапазону k , де $\hat{R}^l(k) = [\hat{H}^l(k)]^H \hat{H}^l(k)$.

ССШ для SIC приймача з ММСЕ може бути виражене як:

$$\gamma_{sic-ccmim}(k) = \frac{q_{mm}^l(k)}{1 - q_{mm}^l(k)} P_m(k), \quad \text{рівняння (27)}$$

$$m = 1 \dots N_s$$

де $q_{mm}^l(k)$ являє собою m -й діагональний елемент $\hat{Q}_{sic}^l(k)$ для піддіапазону k , де $\hat{Q}_{sic}^l(k)$, як показано у рівнянні (21), але базуючись на редукованій матриці $\hat{H}^l(k)$ відгуку каналу замість вихідної матриці $\hat{H}(k)$.

У загальному випадку, ССШ прогресивно поліпшується для потоків символів даних, відновлених на пізніх етапах, оскільки видаляються перешкоди від потоків символів даних, відновлених на попередніх етапах. Це дозволяє використовувати вищі швидкості передачі даних для потоків символів даних, відновлених пізніше.

3. Багатокористувальницький режим направлено просторового мультиплексування

Багатокористувальницький режим направлено просторового мультиплексування (або просто "багатокористувальницький направлений режим") підтримує одночасну передачу даних від одного передавача до множини приймачів, базуючись на "просторових сигнатурах" приймачів. Просторова сигнатура для приймача надається вектором відгуку каналу (для кожного піддіапазону) між N_T передавальними антенами і кожною приймальною антеною у приймачі. Передавач може одержати просторові сигнатури для приймачів, як це описано нижче. Потім передавач може (1) вибрати набір приймачів для одночасної передачі даних і (2) вивести напрямні вектори для потоків символів даних, призначених для передачі у вибрані приймачі таким чином, що перехресні перешкоди для потоків, що передаються, адекватно придушуються у приймачах.

Напрямні вектори у випадку багатокористувальницького направлено режиму можуть бути виведені різними способами. Нижче описано дві ілюстративні схеми. Для простоти наведений нижче опис поданий для одного піддіапазону і передбачається, що кожний приймач обладнаний однією антеною.

У схемі інверсії каналу передавач одержує напрямні вектори для множини приймачів, використовуючи інверсію каналу. Спочатку передавач вибирає N_T одноантенних приймачів для одночасної передачі. Передавач одержує $1 \times N_T$ вектор-рядок $\underline{h}(k)$ відгуку каналу для кожного вибраного приймача і формує $N_T \times N_T$ матрицю $\underline{H}_{mu-s}(k)$ відгуку каналу з N_T векторами-рядками для N_T приймачів. Потім передавач використовує інверсію каналу для одержання матриці $\underline{E}_{mu-s}(k)$ з N_T напрямних векторів для N_T вибраних приймачів наступним чином:

$$\underline{E}_{mu-s}(k) = \underline{H}_{mu-s}^{-1}(k) \quad \text{рівняння (28)}$$

Просторова обробка у передавачі для кожного піддіапазону для багатокористувальницького направлено режиму може бути виражена як:

$$\underline{x}_{mu-s}(k) = \underline{E}_{mu-s}(k) \underline{s}(k) \quad \text{рівняння (29)}$$

де $\underline{x}_{mu-s}(k)$ являє собою вектор символів передачі для багатокористувальницького направлено режиму.

Прийняті символи в N_T вибраних приймачах для кожного піддіапазону можуть бути виражені як:

$$\begin{aligned}\Gamma_{\mu-s} &= H_{\mu-s}(k) \underline{x}_{\mu-s}(k) + \underline{n}(k) \\ &= H_{\mu-s}(k) E_{\mu-s}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k) \quad \text{рівняння (30)} \\ &= \underline{s}(k) + \underline{i}(k) + \underline{n}(k)\end{aligned}$$

де $\Gamma_{\mu-s}(k)$ являє собою $(N_T \times 1)$ вектор прийнятих символів для піддіапазону k і N_T вибраних приймачів, і $\underline{i}(k)$ являє собою перехресну перешкоду внаслідок неідеальності оцінки $E_{\mu-s}(k)$ у передавачі. Кожний вибраний приймач повинен був би одержати тільки один елемент вектора $\Gamma_{\mu-s}(k)$ для кожної приймальної антени. Якщо просторова обробка у передавачі є ефективною, то потужність, що міститься в $\underline{i}(k)$, є малою, і кожний потік відновлених символів даних схильний до малого впливу перехресних перешкод від (N_T-1) інших потоків символів даних, що передаються в інші приймачі.

Передавач також може передавати направлений пілот-сигнал у кожний вибраний приймач, як описано нижче. Потім кожний приймач може обробляти свій направлений пілот-сигнал для оцінки посилення і фази каналу і виконує когерентне демодулювання прийнятих символів від своєї однієї антени з оцінками посилення і фази для одержання потоків відновлених даних.

ССШ, досяжні для багатокористувальницького направленного режиму, являють собою коваріаційну функцію матриці $H_{\mu-s}(k)$ відгуку каналу. Вищі ССШ можуть бути досягнуті при виборі "сумісних" користувальницьких терміналів. Можуть оцінюватися різні набори і/або комбінації користувальницьких терміналів і для передачі даних може вибиратися набір/комбінація з найвищими ССШ.

Хоча схема інверсії каналу є привабливою через свою простоту, у загальному випадку, вона забезпечує низьку продуктивність внаслідок того, що попередня обробка потоків символів даних з оберненою матрицею відгуку каналу у рівнянні (29) примушує передавач направляти основну частку його потужності у найгірші власні моди МІМО каналу. Також у деяких каналах, головним чином, у тих, що мають високу кореляцію між елементами $H_{\mu-s}(k)$, матриця відгуку каналу має неповний ранг, і обчислення оберненої до неї не є можливим.

У схемі попереднього кодування передавач виконує попереднє кодування N_T потоків символів даних, призначених для передачі в N_T вибраних приймачах таким чином, що ці потоки символів даних піддаються у приймачах малим перехресним перешкодам. Передавач може формувати матрицю $H_{\mu}(k)$ відгуку каналу для N_T вибраних приймачів. Потім передавач виконує QR факторизацію для $H_{\mu}(k)$ таким чином, що $H_{\mu}(k) = E_{\text{tri}}(k) Q_{\mu}(k)$, де $E_{\text{tri}}(k)$ являє собою нижню ліву трикутну матрицю, а $Q_{\mu}(k)$ являє собою унітарну матрицю.

Передавач виконує операцію попереднього кодування вектора символу даних, призначеного для передачі $\underline{s}(k) = [s_1(k) \ s_2(k) \ \dots \ s_{N_T}(k)]^T$, для одержання вектора заздалегідь кодованих символів $\underline{a}(k) = [\alpha_1(k) \ \alpha_2(k) \ \dots \ \alpha_{N_T}(k)]^T$, наступним чином:

$$\alpha_i(k) = \frac{1}{f_{ii}(k)} \left(s_i(k) \sum_{i=1}^{I-1} f_{ii}(k) \alpha_i(k) \right) \bmod(M/2), \quad \text{рівняння (31)}$$

для $i = 1 \dots N_T$

де M являє собою кількість рівнів, розділених одиничними інтервалами, у синфазній або квадратурній розмірності квадрата сигнального сузір'я QAM; і

$f_{ii}(k)$ являє собою елемент $E_{\text{tri}}(k)$ у рядку i та стовпці j .

Операція (\bmod) додає достатню кількість цілих співмножників M в аргумент таким чином, що результат задовольняє $\alpha_i(k) \in [-M/2, M/2]$. $a(k) Q_{\mu}(k) \underline{x}_{\mu-rc}(k) = Q_{\mu}(k) \underline{a}(k)$.

Вектор прийнятих символів для схеми попереднього кодування може бути виражений як:

$$\begin{aligned}\Gamma_{\mu-rc}(k) &= H_{\mu}(k) Q_{\mu}^H(k) \underline{a}(k) + \underline{n}(k) = \quad \text{рівняння (32)} \\ &= E_{\text{tri}}(k) \underline{a}(k) + \underline{n}(k)\end{aligned}$$

Можна показати, що $E_{\text{tri}}(k) \underline{a}(k) \bmod(M/2) = \underline{s}(k)$. Таким чином вектор символів даних може бути оцінений як $\underline{x}_{\mu-rc}(k) = \Gamma_{\mu-rc}(k) \bmod(M/2)$. Кожний з N_T вибраних приймачів одержує тільки один з N_T елементів $\Gamma_{\mu-rc}(k)$ і може оцінити символи даних, передані йому за допомогою виконання операції $\bmod(M/2)$ для його прийнятих символів.

У багатокористувальницькому направленому режимі передавач також може передавати множину потоків символів даних у багатоантенний приймач. Матриця $H_{\mu}(k)$ відгуку каналу при цьому включає один вектор-рядок для кожної приймальної антени багатоантенного приймача.

Багатокористувальницький направлений режим також підтримує передачу даних від множини багатоантенних передавачів в один приймач. Кожний багатоантенний передавач виконує просторову обробку свого потоку символів даних для орієнтації потоку у напрямі приймача. Кожний передавач також передає у приймач направлений пілот-сигнал. Для приймача кожний передавач виглядає як одинична передача. Приймач виконує просторову обробку (наприклад, CCMI, MMSE і т.д.) для відновлення направлених потоків символів даних для всіх передавачів.

4. Багатокористувальницький режим ненаправленого просторового мультиплексування

Багатокористувальницький режим ненаправленого просторового мультиплексування (або просто "багатокористувальницький ненаправлений режим") підтримує одночасну передачу даних (1) одним передавачем у множину приймачів (наприклад, для низхідної лінії) і (2) множиною передавачів в один приймач (наприклад, для висхідної лінії).

При ненаправленій передачі від одного передавача у множину приймачів передавач передає один потік символів даних через кожну передавальну антену для приймального приймача. Для кожного приймального приймача можуть передаватися один або декілька потоків символів даних. Кожний приймальний приймач включає в себе, щонайменше, N_T і може виконувати просторову

обробку для ізоляції і відновлення його потоку (потоків) символів даних. Кожний приймач, що потребує передачі даних, оцінює ССШ для кожної з N_T передавальних антен і надсилає N_T оцінок ССШ у передавач. Передавач вибирає набір приймачів для передачі даних, базуючись на оцінках ССШ від всіх приймачів, що потребують передачі даних (наприклад, максимізуючи загальну пропускну здатність).

При ненаправленій передачі від множини передавачів в один приймач передають потоки символів даних через їх антени (тобто, без просторової обробки) таким чином, що ці потоки надходять у приймач приблизно вирівняні за часом. Приймач може оцінити матрицю відгуку кана-

лу для всіх передавачів, як якщо б вони були одним передавачем. Передавач може відновити множину потоків символів даних, використовуючи будь-який зі способів, описаних вище для однокористувальницького ненаправленого режиму (наприклад, способи CCMI, MMSE і SIC).

5. Просторова обробка

У таблиці 2 зведені способи просторової обробки у передавачі і приймачі для чотирьох режимів просторового мультиплексування, описаних вище. Для ненаправлених режимів також можуть бути використані способи обробки у приймачі, відмінні від CCMI і MMSE. Останній стовпець у таблиці 2 вказує, чи може застосовуватися у приймачі спосіб SIC.

Таблиця 2

Режим просторового мультиплексування	Передача $\mathbf{F(k)}$	Прийом $\mathbf{M(k)}$	Масштабування	SIC
Однокористувальницький направлений	$\mathbf{\underline{V}(k)}$	$\mathbf{\underline{U}^H(k)}$	$\mathbf{\underline{\Sigma}^{-1}(k)}$	ні
Однокористувальницький ненаправлений	$\mathbf{\underline{I}}$	$\mathbf{\underline{M}_{ccmi}(k)}$ $\mathbf{\underline{M}_{mmse}(k)}$	$\mathbf{\underline{D}^{-1}_{mmse}(k)}$	так
Багатокористувальницький направлений (один передавач у множину приймачів)	$\mathbf{\underline{H}^{-1}_{mu-s}(k)}$	-	-	ні
Багатокористувальницький ненаправлений (множина передавачів в один приймач)	$\mathbf{\underline{I}}$	$\mathbf{\underline{M}_{ccmi}(k)}$ $\mathbf{\underline{M}_{mmse}(k)}$	$\mathbf{\underline{D}^{-1}_{mmse}(k)}$	так

Для простоти, просторова обробка для багатокористувальницького направленного режиму від множини передавачів в один приймач і багатокористувальницького ненаправленного режиму від одного передавача у множину приймачів у таблиці 2 не показана.

У наведеному нижче описі широкосмуговий просторовий канал може відповідати (1) широкосмуговій власній моді для режиму направленного просторового мультиплексування, (2) передавальній антені для режиму ненаправленного просторового мультиплексування або (3) комбінації одного або декількох просторових каналів для одного або декількох піддіапазонів. Широкосмуговий просторовий канал може бути використаний для передачі одного незалежного потоку даних.

6. MIMO система

На Фіг.1 показана MIMO система 100 множинного доступу з декількома точками 110 доступу (AP), які підтримують обмін даними з декількома користувальницькими терміналами (UT) 120. Для простоти на Фіг.1 показано тільки дві точки 110a і 110b доступу. Точка доступу у загальному випадку є нерухомою станцією, яка використовується для зв'язку з користувальницькими терміналами і також може називатися базовою станцією або яким-небудь іншим терміном. Користувальницький термінал може бути фіксованим або мобільним і також може називатися мобільною станцією, безпроводним пристроєм або яким-небудь іншим терміном. Контролер 130 системи з'єднаний з точ-

ками 110 доступу і забезпечує їх координацію і керування для них.

MIMO система 100 може бути системою дуплексної передачі з часовим розділенням каналів (TDD) або системою дуплексної передачі з частотним розділенням каналів (FDD). Прямі і зворотні лінії (1) для системи TDD зв'язку спільно використовують один діапазон частот і (2) використовують різні діапазони частот для системи FDD. У наведеному нижче описі припускається, що MIMO система 100 являє собою систему TDD.

MIMO система 100 використовує набір транспортних каналів для передачі різних типів даних. Транспортні канали можуть бути реалізовані різними способами.

На Фіг.2 показана ілюстративна структура 200 кадру і каналу, яка може використовуватися у MIMO системі 100. Передача даних відбувається у кадрах TDD. Кожний TDD кадр триває заданий проміжок часу, наприклад, 2мсек, і розділений на фазу низхідної лінії і фазу висхідної лінії. Кожна фаза додатково розділена на множину сегментів, 210, 220, 230, 240 і 250 для множини транспортних каналів.

У фазі низхідної лінії широкомовний канал (BSCH) несе маяк пілот-сигналу 214, MIMO пілот-сигналу 216 і BSCH повідомлення 218. Маяк пілот-сигналу використовують для одержання таймування і частоти. MIMO пілот-сигналу використовують для оцінки каналу. BSCH повідомлення містить системні параметри для користувальницьких терміналів. Прямий керуючий канал (FCCH) несе ін-

формацію планувальника для призначення ресурсів низхідній лінії і висхідній лінії та іншу сигналізацію для користувальницьких терміналів. Прямий канал (FCH) несе FCH блоки даних протоколу (PDU) для низхідної лінії. FCH PDU 232a включає пілот-сигнал 234a і пакет 236a даних, а FCH PDU 232b включає тільки пакет 236b даних. У фазі висхідної лінії зворотний канал (RCH) несе RCH PDU для висхідної лінії. RCH PDU 242a включає тільки пакет 246a даних, і RCH PDU 242b включає пілот-сигнал 244b і пакет 246b даних. Канал довільного доступу (RACH) використовується користувальницькими терміналами для одержання доступу до системи і для відправки коротких повідомлень по висхідній лінії. RACH PDU 252, що передається по RACH, включає пілот-сигнал 254 і повідомлення 256.

На Фіг.3 показана блок-схема у точці 110х доступу і два користувальницькі термінали 120х і 120у в MIMO системі 100. Точка 110х доступу є однією з точок доступу за Фіг.1 і обладнана множиною (N_{ap}) антен 324a-324ар. Користувальницький термінал 120х обладнаний однією антеною 352х, а користувальницький термінал 120у обладнаний множиною (N_{ut}) антен 352a-352ut.

У випадку низхідної лінії у точці 110х доступу TX процесор 310 даних приймає дані трафіку для одного або декількох користувальницьких терміналів з джерела 308 даних, керуючі дані з контролера 330 і, можливо, інші дані з планувальника 334. Різні типи даних можуть передаватися по різних транспортних каналах. TX процесор 310 даних виконує обробку (наприклад, виконує кодування, перемешування і відображення символів) різних типів даних, базуючись на одній або декількох схемах кодування і модулювання для одержання N_s потоків символів даних. Як використовується у даному описі "символ даних" відноситься до символу модулювання для даних, а "пілотний символ" відноситься до символу модулювання для пілот-сигналу. TX просторовий процесор 320 приймає N_s потоків символів даних від TX процесора 310 даних, виконує просторову обробку символів даних з матрицями $E_{ap}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, додатково мультимплексує пілотні символи і надає N_{ap} потоків символів передачі для N_{ap} антен. Матриці $E_{ap}(k)$ виводять відповідно до режиму просторового мультимплексування, вибраного для використання. Обробка у TX процесорі 310 даних і TX просторовому процесорі 320 описана нижче.

Кожний модулятор (MOD) 322 приймає і обробляє відповідний потік символів передачі для одержання потоку OFDM символів, і виконує додаткову обробку (наприклад, посилює, фільтрує і підвищує частоту) потоку OFDM символів для генерації сигналу низхідної лінії. N_{ap} модуляторів 322a-322ар надають N_{ap} сигналів низхідної лінії для передачі через N_{ap} антен 324a-324ар, відповідно, у користувальницькі термінали.

У кожному користувальницькому терміналі 120 одна або декілька антен 352 приймають N_{ap} сигналів низхідної лінії, і кожна антена надає прийнятий сигнал у відповідний демодулятор (DEMOD) 354. Кожний демодулятор 354 виконує обробку, компліментарну виконуваний модулятором 322, і надає потік прийнятих символів. Для одноантенного ко-

ристувальницького термінала 120х RX просторовий процесор 360х виконує когерентне демодулювання потоку прийнятих символів з єдиного демодулятора 354х і надає один потік відновлених символів даних. Для багатоантенного користувальницького термінала 120у RX просторовий процесор 360у виконує просторову обробку N_{ut} потоків прийнятих символів від N_{ut} демодуляторів 354 з матрицями $M_{ut}(k)$ просторової фільтрації, для $k=1 \dots N_F$, і надає N_{ut} потоків відновлених символів даних. У будь-якому випадку кожний потік $\{\hat{s}_m\}$ відновлених символів даних є оцінкою потоку $\{s_m\}$ символів даних, переданих точкою 110х доступу у даний користувальницький термінал 120. RX процесор 370 даних приймає і демультимплексує відновлені символи даних у відповідні транспортні канали. Потім відновлені символи даних для кожного транспортного каналу обробляють (наприклад, виконують обернене відображення, обернене перемешування і декодування) для одержання декодованих даних для даного транспортного каналу. Декодовані дані для кожного транспортного каналу можуть включати відновлені дані трафіку, керуючі дані і т.д., які можуть бути направлені у споживач 372 даних для збереження і/або у контролер 380 для подальшої обробки.

У кожному користувальницькому терміналі 120 пристрій 378 оцінки каналу оцінює відгук низхідного каналу і надає оцінки каналу, які можуть включати оцінки посилення каналу, оцінки ССШ і т.д. Контролер 380 приймає оцінки каналу, виводить вектори і/або коефіцієнти, використовувані при просторовій обробці у передавальному і приймальному ланцюгах, і визначає придатну швидкість для кожного потоку символів даних низхідної лінії. Наприклад, контролер 380у у багатоантенному користувальницькому терміналі 120у може виводити матриці $M_{ut}(k)$ просторової фільтрації для низхідної лінії і матриці $E_{ut}(k)$ напрямних векторів для висхідної лінії, базуючись на матрицях $H_{du}(k)$ відгуку низхідного каналу, для $k=1 \dots N_F$. Контролер 380 також може приймати статус кожного пакету/кадру, прийнятого по низхідній лінії, і компонує інформацію зворотного зв'язку для точки 110х доступу. Інформація зворотного зв'язку і дані висхідної лінії обробляються у TX процесорі 390 даних, піддаються просторовій обробці у TX просторовому процесорі 392 (якщо він наявний у користувальницькому терміналі 120), додатково мультимплексується з пілотними символами, додатково обробляються в одному або декількох модуляторах 354 і передаються через одну або декілька антен 352 у точку 110х доступу.

У точці 110х доступу передані сигнали висхідної лінії приймаються антенами 324, демодулюються демодуляторами 322 і обробляються в RX просторовому процесорі 340 і RX процесорі 342 даних способом, компліментарним виконуваному у користувальницьких терміналах 120. Відновлена інформація зворотного зв'язку надається у контролер 330 і планувальник 334. Планувальник 334 може використовувати інформацію зворотного зв'язку для виконання функцій, таких як (1) планування набору користувальницьких терміналів для передачі даних по низхідній лінії і висхідній лінії і

(2) призначення доступних ресурсів низхідної лінії і висхідної лінії запланованим терміналам.

Контролери 330 і 380 керують роботою різних блоків обробки у точці 110х доступу і користувальницькому терміналі 120, відповідно. Наприклад, контролер 380 може визначати найвищі швидкості, підтримувані просторовими каналами низхідної лінії для користувальницького терміналу 120. Контролер 330 може вибирати швидкість, розмір корисного навантаження і розмір OFDM символу для кожного просторового каналу кожного запланованого користувальницького терміналу.

Обробка у точці 110х доступу і користувальницьких терміналах 120х і 120у для висхідної лінії може бути такою ж, як обробка для низхідної лінії, або відмінною від неї. Для простоти, нижче детально описана обробка для низхідної лінії.

На Фіг.4 показана блок-схема варіанту здійснення TX процесора 310 даних у точці 110х доступу. Для цього варіанту здійснення TX процесор 310 даних включає один набір з кодера 412, каналного перемежувача 414 і блока 416 відображення символів для кожного з N_s потоків даних. Для кожного потоку $\{d_m\}$ даних, де $m=1 \dots N_s$, кодер 412 приймає і кодує потік даних, базуючись на схемі кодування, вибраній для цього потоку, і надає кодовані біти. Схема кодування може включати CRC кодування, згорткове кодування, турбокодування, кодування з низькою щільністю перевірок на парність (LDPC), блокове кодування та інші види кодування або їх комбінації. Канальний перемежувач 414 виконує перемежовування (тобто, змінює порядок проходження) кодованих бітів, базуючись на схемі перемежовування. Блок 416 відображення символів відображає піддані перемежовуванню біти, базуючись на схемі модулювання, вибраній для цього потоку, і надає потік $\{s_m\}$ символів даних. Блок 416 групує кожний набір з B підданих перемежовуванню бітів для формування B -бітного двійкового значення, де $B \geq 1$, і далі відображає кожне B -бітне двійкове значення на визначений символ даних, базуючись на вибраній схемі модулювання (наприклад, QPSK, M-PSK або M-QAM, де $M=2^B$). Кодування і модулювання для кожного потоку даних виконують відповідно до сигналів керування кодуванням і модулюванням, що надаються контролером 330.

На Фіг.5 показана блок-схема варіанту здійснення TX просторового процесора 320 і модуляторів 322а-322ар у точці 110х доступу. Для цього варіанту здійснення TX просторовий процесор 320 включає N_s демультимплексорів (Demux) 510а-510s, N_F TX просторових процесорів 520а-520f піддіапазонів і N_{ap} мультиплексорів (MUX) 530а-530ар. Кожний демультимплексор 510 приймає відповідний потік $\{s_m\}$ символів даних від TX просторового процесора 320, демультимплексує потік на N_F підпотоків символів даних для N_F піддіапазонів і надає N_F підпотоків в N_F просторових процесорів 520а-520f. Кожний просторовий процесор 520 приймає N_s підпотоків символів даних для його піддіапазону від N_s демультимплексорів 510а-510s, виконує просторову обробку у передавачі для цих підпотоків і надає N_{ap} підпотоків символів передачі для N_{ap} антен у точці доступу. Кожний просторовий процесор 520 множить вектор $\underline{s}_{dn}(k)$ даних на

матрицю $\underline{E}_{ap}(k)$ для одержання вектора $\underline{x}_{dn}(k)$ передачі. Матриця $\underline{E}_{ap}(k)$ відповідає (1) матриці $\underline{V}_{dn}(k)$ правих власних векторів для $\underline{H}_{dn}(k)$ для однокористувальницького направленного режиму, (2) матриці $\underline{E}_{mu}(k)$ для багатокористувальницького направленного режиму або (3) одиничній матриці I для однокористувальницького ненаправленного режиму.

Кожний мультиплексоор 530 приймає N_F підпотоків символів передачі для його передавальної антени від N_F просторових процесорів 520а-520f, мультиплексує ці підпотоки і пілотні символи і надає потік $\{x_j\}$ символів передачі для його передавальної антени. Пілотні символи можуть бути мультиплексовані за частотою (тобто, у деякі піддіапазони), за часом (тобто, у деякі періоди символів) і/або у кодовому просторі (тобто, з ортогональними кодами). N_{ap} мультиплексорів 530а-530ар надають N_{ap} потоків $\{x_j\}$ символів передачі, для $j=1 \dots N_{ap}$, для N_{ap} антен 324а-324ар.

Для варіанту здійснення, показаного на Фіг.5, кожний модулятор 322 включає блок 542 оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT), генератор 544 циклічного префікса і блок TX RF. Блок 542 IFFT і генератор 544 циклічного префікса утворюють OFDM модулятор. Кожний модулятор 322 приймає відповідний потік $\{x_j\}$ символів передачі з TX просторового процесора 320 і групує кожний набір з N_F символів передачі для N_F піддіапазонів. Блок 542 IFFT перетворює кожний набір N_F символів передачі у часовий домен, використовуючи N_F точкове обернене швидке перетворення Фур'є, і надає відповідний перетворений символ, який містить N_F елементарних сигналів. Генератор 544 циклічного префікса повторює частину кожного перетвореного символу для одержання відповідного OFDM символу, який містить N_F+N_{cp} елементарних сигналів. Повторювана частина (тобто циклічний префікс) гарантує, що OFDM символ збереже свої ортогональні властивості у присутності багатопроменового розкиду затримок, викликаного частотно-селективним замиранням. Блок 546 TX RF приймає і додатково обробляє потік OFDM символів з генератора 544 для генерації модульованого сигналу низхідної лінії. N_{ap} модульованих сигналів низхідної лінії передають через N_{ap} антен 354а-354ар, відповідно.

На Фіг.6 показана блок-схема варіанту здійснення демодуляторів 354а-354ut і RX просторового процесора 360у для багатоантенного користувальницького терміналу 120у. У користувальницькому терміналі 120у N_{ut} антен 354а-354ut приймають N_{ap} модульованих сигналів, переданих точкою 110х доступу, і надають N_{ut} прийнятих сигналів в N_{ut} демодуляторів 354а-354ut, відповідно. Кожний демодулятор 354 включає блок 612 RX RF, блок 614 видалення циклічного префікса і блок 616 швидкого перетворення Фур'є (FFT). Блоки 614 і 616 утворюють OFDM демодулятор. У кожному демодуляторі 354 блок 612 RX RF приймає, обробляє і цифрує відповідний прийнятий сигнал і надає потік елементарних сигналів. Блок 614 видалення циклічного префікса видаляє циклічний префікс у кожному прийнятому OFDM символі для одержання прийнятого перетвореного символу. Потім блок 616 FFT перетворює кожний прийнятий перетворений символ у

частотний домен за допомогою N_F точкового швидкого перетворення Фур'є для одержання N_F прийнятих символів для N_F піддіапазонів. Блок 616 FFT надає потік прийнятих символів в RX просторовий процесор 360у і потік прийнятих пілотних символів у пристрій 378у оцінки каналу.

Для варіанту здійснення, показаного на Фіг.6, RX просторовий процесор 360у включає N_{ut} демультіплексорів 630а-630ut для N_{ut} антен у користувальницькому терміналі 120у, N_F RX просторових процесорів 640а-640f піддіапазонів і N_F пристроїв 642а-642f масштабування для N_F піддіапазонів, і N_s мультиплексорів 650а-650s для N_s потоків даних. RX просторовий процесор 360у одержує N_{ut} потоків $\{r_i\}$ прийнятих символів, для $i=1 \dots N_{ut}$, з демодуляторів 354а-354ut. Кожний демультіплексор 630 приймає відповідний потік $\{r_i\}$ прийнятих символів, демультіплексує потік на N_F підпотоків прийнятих символів для N_F піддіапазонів і надає N_F підпотоків в N_F просторових процесорів 640а-640f. Кожний просторовий процесор 640 одержує N_{ut} підпотоків прийнятих символів для його піддіапазону з N_{ut} демультіплексорів 630а-630ut, виконує просторову обробку у приймачі для цих підпотоків і надає N_s підпотоків детектованих символів для його піддіапазону. Кожний просторовий процесор 640 множить прийнятий вектор $\underline{r}_{dn}(k)$ на матрицю $\underline{M}_{nt}(k)$ для одержання вектора $\underline{\tilde{s}}_{dn}(k)$ детектованих символів. Матриця $\underline{M}_{nt}(k)$ відповідає (1) матриці $\underline{U}_{dn}^H(k)$ лівих власних векторів для $\underline{H}_{dn}(k)$ у випадку однокористувальницького напруженого режиму або (2) матриці $\underline{M}_{cmi}(k)$, $\underline{M}_{mmse}(k)$ або якій-небудь іншій матриці у випадку однокористувальницького ненапруженого режиму.

Кожний блок 642 масштабування приймає N_s підпотоків детектованих символів для свого піддіапазону, масштабує ці підпотіки і надає N_s підпотоків відновлених символів даних для свого піддіапазону. Кожний блок 642 масштабування виконує масштабування сигналу для вектора $\underline{\tilde{s}}_{dn}(k)$ детектованих символів за допомогою діагональної матриці $\underline{D}_{ut}^{-1}(k)$ і надає вектор $\underline{\hat{s}}_{dn}(k)$ відновлених символів даних. Кожний мультиплексор 650 приймає і мультиплексує N_F підпотоків відновлених символів даних для його потоку даних з N_F блоків 642а-642f масштабування і надає потік відновлених символів даних. N_s мультиплексорів 650а-650s надають N_s потоків $\{\hat{s}_m\}$ відновлених символів даних, для $m=1 \dots N_s$.

На Фіг.7 показана блок-схема варіанту здійснення RX процесора 370у даних у користувальницькому терміналі 120у. RX процесор 370у даних включає один набір з блоку 712 оберненого відображення символів, оберненого перемешувача 714 каналу і декодера 716 для кожного з N_s потоків даних. Для кожного потоку $\{\hat{s}_m\}$ відновлених символів даних, де $m=1 \dots N_s$, блок 712 оберненого відображення символів виконує демодулювання відновлених символів даних відповідно до схеми модулювання, використовуваної для цього потоку, і надає демодульовані дані. Обернений перемешувач 714 каналу виконує обернене перемешування демодульованих даних способом, компліментарним перемешуванню, виконуваному для

цього потоку у точці 110х доступу. Потім декодер 716 декодує піддані оберненому перемешуванню дані способом, компліментарним кодуванню, що виконується для цього потоку у точці 110х доступу. Наприклад, як декодер 716 можуть використовуватися турбодекодер або декодер Вітербі, якщо у точці 110х доступу виконується турбокодування або згорткове кодування, відповідно. Декодер 716 надає декодований пакет для кожного пакету прийнятих даних. Декодер 716 додатково виконує перевірку кожного декодованого пакету для визначення, був пакет декодований вірно або з помилкою, і надає статус декодованого пакету. Демодулювання і декодування для кожного потоку відновлених символів даних виконують відповідно до сигналів керування демодулюванням і декодуванням, що надаються контролером 380у.

На Фіг.8 показана блок-схема RX просторового процесора 360z і RX процесора 370z даних, які реалізують спосіб SIC. RX просторовий процесор 360z і RX процесор 370z даних реалізують N_s послідовних (тобто, каскадованих) етапів (каскадів) обробки у приймачі для N_s потоків символів даних. Кожний з етапів (каскадів) з 1 по N_s-1 включає в себе просторовий процесор 810, пристрій 820 видалення перешкоди, RX процесор 830 потоку даних і TX процесор 840 потоку даних. Останній етап включає тільки просторовий процесор 810s і RX процесор 830s потоку даних. Кожний RX 830 потоку даних включає блок 712 оберненого відображення символів, обернений перемешувач 714 каналу і декодер 716, як показано на Фіг.7. Кожний TX процесор 840 потоку даних включає кодер 412, перемешувач 414 каналу і блок 416 відображення символів, як показано на Фіг.4.

На етапі 1 просторовий процесор 810а виконує просторову обробку у приймачі N_{ut} потоків прийнятих символів і надає один потік $\{\hat{s}_{j1}\}$ відновлених символів даних, де підрядковий індекс j_1 позначає антену у точці доступу, використовувану для передачі потоку $\{s_{j1}\}$ символів даних. RX процесор 830а потоку даних виконує демодулювання, обернене перемешування і декодування потоку $\{\hat{s}_{j1}\}$ відновлених символів даних і надає відповідний потік $\{\hat{d}_{j1}\}$ декодованих даних. TX процесор 840а потоку даних виконує кодування, перемешування і модулювання потоку $\{\hat{d}_{j1}\}$ декодованих даних тим же способом, який виконується у точці 110х доступу для цього потоку і надає $\{\hat{s}_{j1}\}$ повторно модульованих символів. Пристрій 820а видалення перешкоди виконує просторову обробку потоку $\{\hat{s}_{j1}\}$ повторно модульованих символів тим же способом (якщо він виконується), який виконується у точці 110х доступу і додатково обробляє результат за допомогою матриці $\underline{H}_{dn}(k)$ відгуку каналу для одержання N_{ut} компонентів перешкоди, пов'язаної з потоком $\{s_{j1}\}$ символів. N_{ut} компонентів перешкоди віднімають з N_{ut} потоків прийнятих символів для одержання N_{ut} потоків модифікованих символів, які надаються на етап 2.

Кожний з етапів з 2 по N_s-1 виконує ту ж саму обробку, що і етап 1, за винятком того, що одер-

жують N_{ut} потоків модифікованих символів з попереднього етапу замість N_{ut} потоків прийнятих символів. Останній етап виконує просторову обробку і декодування N_{ut} потоків модифікованих символів з етапу N_S-1 і не виконує оцінки і видалення перешкоди.

Просторові процесори 810a-810s кожний можуть реалізовувати способи CCMI, MMSE або який-небудь інший спосіб обробки у приймачі. Кожний просторовий процесор 810 множить вектор $\underline{r}_{dn}(k)$ вхідних (прийнятих або модифікованих) символів на матрицю $\underline{M}_{ut}(k)$ для одержання вектора $\underline{\tilde{r}}_{dn}(k)$ детектованих символів, вибирає і масштабує один з потоків детектованих символів, і надає потік масштабованих символів як потік відновлених символів даних для цього етапу. Матрицю $\underline{M}_{ut}(k)$ виводять, базуючись на редукованій матриці $\underline{H}_{ut}(k)$ відгуку каналу для цього етапу.

Блоки обробки у точці 110х доступу і користувальницькому терміналі 120у для висхідної лінії можуть бути реалізовані, як описано вище для низхідної лінії. TX процесор 390у даних і TX просторовий процесор 392у можуть бути реалізовані у вигляді TX процесора 310 даних за Фіг.4 і TX просторового процесора 320 за Фіг.5, відповідно. RX просторовий процесор 340 може бути реалізований у вигляді RX просторового процесора 360у або 360z, і RX процесор 342 даних може бути реалізований у вигляді процесора 370у або 370z.

Для одноантенного користувальницького термінала 120х RX просторовий процесор 360х виконує когерентне демодулювання одного потоку прийнятих символів з оцінками каналу для одержання потоку відновлених символів даних.

А. Оцінка каналу

Відгук каналу для низхідної лінії і висхідної лінії може бути оцінений різними способами, наприклад за допомогою MIMO пілот-сигналу або направленого пілот-сигналу. Для TDD MIMO системи для спрощення оцінки каналу можуть використовуватися визначені способи.

У випадку низхідної лінії точка 110х доступу може передавати MIMO пілот-сигнал користувальницьким терміналам 120. MIMO пілот-сигнал містить N_{ap} передач пілот-сигналу від N_{ap} антен точок доступу, причому передача пілот-сигналу через кожну антену "покрита" різними ортогональними послідовностями (наприклад, послідовностями Уолша). Покриття являє собою процес, за допомогою якого даний символ модулювання (або набір з L символів модулювання з однаковим значенням), призначений для передачі, множать на L елементарних сигналів L -сигнальної ортогональної послідовності для одержання L покритих символів, які потім передаються. При покритті досягається ортогональність для N_{ap} передач пілот-сигналу, відправлених через N_{ap} антен точки доступу, що дозволяє користувальницьким терміналам розрізняти передачу пілот-сигналу від кожної антени.

У кожному користувальницькому терміналі 120 пристрій 378 оцінки каналу "знімає покриття" прийнятих пілотних символів для кожної антени і користувальницького термінала за допомогою таких же N_{ap} ортогональних послідовностей, які викорис-

товувалися у точці 110х доступу для N_{ap} антен, для одержання оцінок комплексного посилення каналу між антеною і користувальницького термінала і кожною з N_{ap} антен у точці доступу. Зняття покриття є компліментарним до покриття і являє собою процес, за допомогою якого прийняті (пілотні) символи множать на L елементарних сигналів L -сигнальної ортогональної послідовності для одержання L символів зі знятим покриттям, які потім підсумовують для одержання оцінки переданого (пілотного) символу. Пристрій 378 оцінки каналу виконує таку ж обробку пілот-сигналу для кожного піддіапазону, використовуваного для передачі пілот-сигналу. Якщо пілотні символи передають тільки у підмножині N_F піддіапазонів, то пристрій 378 оцінки каналу може виконати інтерполяцію оцінок відгуку каналу для піддіапазонів з передачею пілот-сигналу для одержання оцінок відгуку каналу для піддіапазонів без передачі пілот-сигналу. Для одноантенного користувальницького термінала 120х пристрій 378х оцінки каналу надає вектори $\hat{\underline{h}}_{dn}(k)$ оцінок відгуків низхідного каналу, для $k=1 \dots N_F$, для однієї антени 352. Для багатоантенного користувальницького термінала 120у пристрій 378у оцінки каналу виконує таку ж обробку пілот-сигналу для всіх N_{ut} антен 352a-352ut і надає матриці $\hat{\underline{H}}_{dn}(k)$ оцінок відгуків низхідного каналу, для $k=1 \dots N_F$. Кожний користувальницький термінал 120 також може оцінювати дисперсію шуму для низхідної лінії, базуючись на прийнятих пілотних символах, і надає оцінку шуму низхідної лінії, $\hat{\sigma}_{dn}^2$.

У випадку висхідної лінії багатоантенний користувальницький термінал 120у може передавати MIMO пілот-сигнал, який може бути використаний у точці 110х доступу для оцінки відгуку $\underline{h}_{up}(k)$ висхідного каналу для користувальницького термінала 120у. Одноантенний користувальницький термінал 120х може передавати пілот-сигнал через свою єдину антену. Множина одноантенних користувальницьких терміналів 120 може передавати ортогональні пілот-сигнали одночасно по висхідній лінії, причому ортогональність може досягатися за часом і/або частотою. Часова ортогональність може бути одержана за допомогою покриття кожним користувальницьким терміналом свого пілот-сигналу висхідної лінії різними ортогональними послідовностями, пов'язаними з даним користувальницьким терміналом. Частотна ортогональність може бути одержана при передачі кожним користувальницьким терміналом свого пілот-сигналу висхідної лінії у різному наборі піддіапазонів. Одночасні передачі пілот-сигналів по висхідній лінії від множини користувальницьких терміналів повинні бути приблизно вирівняні за часом у точці 110х доступу (наприклад, вирівняні за часом у межах циклічного префікса).

Для TDD MIMO системи звичайно присутній високий ступінь кореляції між відгуками каналу для низхідної лінії і висхідної лінії, оскільки ці лінії спільно використовують один і той же діапазон частот. Проте, відгуки передавальних/приймальних ланцюгів у точці доступу, як правило, не співпадають з відгуками передавальних/приймальних лан-

цюгів у користувацькому терміналі. Якщо вказану відмінність визначають і враховують за допомогою калібрування, то загальні відгуки низхідної лінії і висхідної лінії можуть розглядатися як взаємообернені (тобто транспоновані) по відношенню один до одного.

На Фіг.9 показані приймальні/передавальні ланцюги у точці 110х доступу і користувацькому терміналі 120у. У точці 110х доступу передавальний тракт моделюється $N_{ap} \times N_{ap}$ матрицею $\underline{I}_{ap}(k)$, і приймальний тракт моделюється $N_{ap} \times N_{ap}$ матрицею $R_{ap}(k)$. У користувацькому терміналі 120у приймальний тракт моделюється $N_{ut} \times N_{ut}$ матрицею $R_{ut}(k)$, і передавальний тракт моделюється $N_{ut} \times N_{ut}$ матрицею $\underline{I}_{ut}(k)$. Вектор прийнятих символів для низхідної лінії і висхідної лінії для кожного піддіапазону може бути виражений як:

$$\begin{aligned} \underline{r}_{dn}(k) &= \underline{R}_{ut}(k) \underline{H}(k) \underline{I}_{ap}(k) \underline{x}_{dn}(k) \\ \underline{r}_{up}(k) &= \underline{R}_{ap}(k) \underline{H}^T(k) \underline{I}_{ut}(k) \underline{x}_{up}(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (33)}$$

де "T" означає транспонування. У рівнянні (34) припускається, що низхідна лінія і висхідна лінія є транспонованими по відношенню одна до одної. "Ефективні" відгуки низхідного і висхідного каналів, $\underline{H}_{edn}(k)$ і $\underline{H}_{eup}(k)$ для кожного піддіапазону включають в себе відгуки передавального і приймального ланцюгів і можуть бути виражені як:

$$\begin{aligned} \underline{H}_{edn}(k) &= \underline{R}_{ut}(k) \underline{H}(k) \underline{I}_{ap}(k) \\ \underline{H}_{eup}(k) &= \underline{R}_{ap}(k) \underline{H}^T(k) \underline{I}_{ut}(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (34)}$$

Ефективні відгуки низхідного і висхідного каналів не є взаємооберненими по відношенню один до одного (тобто $\underline{H}_{edn}(k) \neq \underline{H}_{eup}(k)$), якщо відгуки передавальних/приймальних ланцюгів низхідної лінії і висхідної лінії не дорівнюють один одному.

Точка 110х доступу і користувацький термінал 120у можуть виконати калібрування для одержання поправкових матриць $\underline{K}_{ap}(k)$ і $\underline{K}_{ut}(k)$ для кожного піддіапазону, які можуть бути виражені як:

$$\begin{aligned} \underline{K}_{ap}(k) &= \underline{I}_{ap}^{-1}(k) \underline{R}_{ap}(k) \\ \underline{K}_{ut}(k) &= \underline{I}_{ut}^{-1}(k) \underline{R}_{ut}(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (35)}$$

Поправкові матриці можуть бути одержані за допомогою передачі MIMO пілот-сигналів як по низхідній лінії, так і по висхідній лінії, і виведення поправкових матриць, використовуючи критерій MMSE або які-небудь інші способи. Поправкові матриці $\underline{K}_{ap}(k)$ і $\underline{K}_{ut}(k)$ використовують у точці 110х доступу і користувацькому терміналі 120у, відповідно, як показано на Фіг.9. Відгуки "каліброваних" низхідного і висхідного каналів, $\underline{H}_{edn}(k)$ і $\underline{H}_{cup}(k)$, при цьому є взаємооберненими по відношенню один до одного і можуть бути виражені як:

$$\begin{aligned} \underline{H}_{cup}(k) &= \underline{H}_{up}(k) \underline{K}_{ut}(k) = \\ &= (\underline{H}_{dn}(k) \underline{K}_{ap}(k))^T = \underline{H}_{cdn}^T(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (36)}$$

Розкладання по сингулярних значеннях матриць відгуків висхідного і низхідного каналів, $\underline{H}_{cdn}(k)$ і $\underline{H}_{cup}(k)$, для кожного піддіапазону може бути виражене як:

$$\begin{aligned} \underline{H}_{cup}(k) &= \underline{U}_{up}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}_{ut}^H(k) \\ \underline{H}_{cdn}(k) &= \underline{V}_{ut}^*(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{U}_{ap}^H(k) \end{aligned} \quad \text{рівняння (36)}$$

Як показано у системі рівнянь (37) матриці $\underline{V}_{ut}^*(k)$ і $\underline{U}_{ap}^*(k)$ лівих і правих власних векторів для $\underline{H}_{cdn}(k)$ є комплексно спряженими матрицями $\underline{V}_{ut}(k)$ і $\underline{U}_{ap}(k)$ правих і лівих власних векторів $\underline{H}_{cup}(k)$. Матриця $\underline{U}_{ap}(k)$ може бути використана у точці 110х доступу для просторової обробки, як при передачі, так і при прийомі. Матриця $\underline{V}_{ut}(k)$ може бути використана у користувацькому терміналі 120у для просторової обробки, як при передачі, так і при прийомі.

Внаслідок взаємооберненої природи MIMO каналу для TDD MIMO системи і після виконання калібрування для врахування відмінностей у передавальних/приймальних ланцюгах, розкладання по сингулярних значеннях повинне бути виконане тільки або у користувацькому терміналі 120у, або у точці 110х доступу. У випадку виконання у користувацькому терміналі 120у матриці $\underline{V}_{ut}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, використовуються для просторової обробки у користувацькому терміналі, а матриця $\underline{U}_{ap}(k)$, для $k=1 \dots N_F$, може бути надана у точку доступу, або безпосередньо (тобто шляхом передачі елементів матриці $\underline{U}_{ap}(k)$), або опосередковано (наприклад, за допомогою направленного пілот-сигналу). Реально користувацький термінал 120у може одержати тільки $\hat{\underline{H}}_{cdn}(k)$, що є оцінкою $\underline{H}_{cdn}(k)$, і може вивести тільки $\hat{\underline{V}}_{ut}(k)$, $\hat{\underline{\Sigma}}(k)$ і $\hat{\underline{U}}_{ap}(k)$, які являють собою оцінки $\underline{V}_{ut}(k)$, $\underline{\Sigma}(k)$ і $\underline{U}_{ap}(k)$, відповідно. Для простоти у наведеному і нижче описі робиться припущення, що оцінка каналу виконана без помилок.

Направлений пілот-сигнал висхідної лінії, що передається користувацьким терміналом 120у може бути виражений як:

$$\underline{x}_{up,m}(k) = \underline{K}_{ut}(k) \underline{v}_{ut,m}(k) p(k) \quad \text{рівняння (38)}$$

де $\underline{v}_{up,m}(k)$ являє собою m-й стовпець $\underline{V}_{ut}(k)$, і $p(k)$ являє собою пілотний символ. Прийнятий направлений пілот-сигнал висхідної лінії у точці 110х доступу може бути виражений як:

$$\underline{r}_{up,m}(k) = \underline{U}_{ap,m}(k) \sigma_{mp}(k) + \underline{n}_{up}(k) \quad \text{рівняння (39)}$$

З рівняння (39) випливає, що точка 110х доступу може одержати матрицю $\underline{U}_{ap}(k)$, один вектор одноразово, базуючись на направленому пілот-сигналі висхідної лінії від користувацького терміналу 120у.

Також може бути виконаний компліментарний процес, при якому користувацький термінал 120у передає MIMO пілот-сигнал по висхідній лінії, а точка 110х доступу виконує розкладання по син-

гулярних значеннях і передає направлений пілот-сигнал по низхідній лінії. Оцінки каналу для низхідної лінії і висхідної лінії також можуть бути виконані іншими способами.

У кожному користувальницькому терміналі 120 пристрій 378 оцінки каналу може виконати оцінку відгуку низхідного каналу (наприклад, базуючись на MIMO пілот-сигналі або направленому пілот-сигналі, що передається точкою 110х доступу) і надати оцінки низхідного каналу у контролер 380. Для одноантенного користувальницького терміналу 120х контролер 380х може вивести комплексні посилення каналу, використовувані для когерентного демодулювання. Для багатоантенного користувальницького терміналу 120у контролер 380у може вивести матрицю $\underline{M}_{ul}(k)$, використовувану для просторової обробки при прийомі, і матрицю $\underline{E}_{ul}(k)$, використовувану для просторової обробки при передачі, базуючись на оцінках низхідного каналу. У точці 110х доступу пристрій 328 оцінки каналу може виконати оцінку відгуку висхідного каналу (наприклад, базуючись на направленому пілот-сигналі або MIMO пілот-сигналі, що передається користувальницьким терміналом 120) і надати оцінки висхідного каналу у контролер 380. Контролер 380 може вивести матрицю $\underline{E}_{ap}(k)$, використовувану для просторової обробки при передачі, і матрицю $\underline{M}_{ap}(k)$, використовувану для просторової обробки при прийомі, базуючись на оцінках висхідного каналу.

На Фіг.10 показана просторова обробка у точці 110х доступу і користувальницькому терміналі 120у для низхідної лінії і висхідної лінії для одного піддіапазону k . У випадку висхідної лінії у TX просторовому процесорі 320 у точці 110х доступу вектор $\underline{s}_{dn}(k)$ даних спочатку множать на матрицю $\underline{E}_{ap}(k)$ у блоці 910 і далі множать на поправкову матрицю $\underline{K}_{ap}(k)$ у блоці 912 для одержання вектора $\underline{x}_{dn}(k)$ передачі. Вектор $\underline{x}_{dn}(k)$ обробляється передавальним ланцюгом 914 у модуляторах 322 і передається по MIMO каналу у користувальницький термінал 120у. Блоки 910 і 912 виконують просторову обробку при передачі для низхідної лінії і можуть бути реалізовані у TX просторовому процесорі 520 піддіапазону за Фіг.5.

У користувальницькому терміналі 120у сигнали низхідної лінії обробляються приймальним ланцюгом 954 у демодуляторах 354 для одержання прийнятого вектора $\underline{r}_{dn}(k)$. В RX просторовому процесорі 360у прийнятий вектор $\underline{r}_{dn}(k)$ спочатку множать на матрицю $\underline{M}_{ul}(k)$ у блоці 956 і потім масштабують за допомогою оберненої діагональної матриці $\underline{D}_{ul}^{-1}(k)$ у блоці 958 для одержання вектора $\hat{\underline{s}}_{dn}(k)$, який являє собою оцінку вектора $\underline{s}_{dn}(k)$ даних. Блоки 956 і 958 виконують просторову об-

робку при прийомі для низхідної лінії і можуть бути реалізовані в RX просторовому процесорі 640 піддіапазону за Фіг.6.

У випадку висхідної лінії у TX просторовому процесорі 392у у користувальницькому терміналі 120у вектор $\underline{s}_{up}(k)$ даних спочатку множать на матрицю $\underline{E}_{ul}(k)$ у блоці 960 і далі множать на поправкову матрицю $\underline{K}_{ul}(k)$ у блоці 962 для одержання вектора $\underline{x}_{up}(k)$ передачі. Вектор $\underline{x}_{up}(k)$ обробляється у передавальному ланцюзі 964 у модуляторах 354 і передається по MIMO каналу у точку 110х доступу. Блоки 960 і 962 виконують просторову обробку при передачі для висхідної лінії.

У точці 110х доступу сигнали висхідної лінії обробляються приймальним ланцюгом 924 у демодуляторах 322 для одержання прийнятого вектора $\underline{r}_{up}(k)$. У RX просторовому процесорі 340 прийнятий вектор $\underline{r}_{up}(k)$ спочатку множать на матрицю $\underline{M}_{ap}(k)$ у блоці 926 і потім масштабують за допомогою оберненої діагональної матриці $\underline{D}_{ul}^{-1}(k)$ у блоці 928 для одержання вектора $\hat{\underline{s}}_{up}(k)$, який являє собою оцінку вектора $\underline{s}_{up}(k)$ даних. Блоки 926 і 928 виконують просторову обробку при прийомі для висхідної лінії.

В. Просторова обробка для TDD MIMO системи

У таблиці 3 зведені ілюстративні варіанти передачі пілот-сигналу і просторової обробки, що виконується у точці доступу і користувальницьких терміналах при передачі даних по низхідній лінії і висхідній лінії для різних режимів просторового мультиплексування у TDD MIMO системі. Для однокористувальницького направленного режиму точка доступу передає MIMO пілот-сигнал, даючи можливість користувальницькому терміналу оцінити відгук низхідного каналу. Користувальницький термінал передає направлений пілот-сигнал, даючи можливість точці доступу оцінити відгук висхідного каналу. Точка доступу виконує просторову обробку при передачі і прийомі за допомогою $\underline{U}_{ap}(k)$. Користувальницький термінал виконує просторову обробку при передачі і прийомі за допомогою $\underline{V}_{ul}(k)$.

Для однокористувальницького ненаправленного режиму для передачі даних по низхідній лінії точка доступу передає MIMO пілот-сигнал через всі антени і потік символів даних через кожну антену. Користувальницький термінал оцінює відгук низхідного каналу за допомогою MIMO пілот-сигналу і виконує просторову обробку при прийомі, використовуючи оцінки низхідного каналу. Для передачі даних по висхідній лінії виконується компліментарна обробка.

Таблиця 3

Режим просторового мультимплексування	Передача даних по низхідній лінії	Передача даних по висхідній лінії
однокористувальницький направлений	AP передає MIMO пілот-сигнал UT передає направлений пілот-сигнал AP передає дані з $\underline{U}_{ap}(k)$ UT приймає дані з $\underline{V}_{ut}(k)$	AP передає MIMO пілот-сигнал UT передає направлений пілот-сигнал UT передає дані з $\underline{V}_{ut}(k)$ AP приймає дані з $\underline{U}_{ap}(k)$
однокористувальницький ненаправлений	AP передає MIMO пілот-сигнал AP передає дані через кожну антену UT використовує CCMI, MMSE і т.д.	UT передає MIMO пілот-сигнал UT передає дані через кожну антену AP використовує CCMI, MMSE і т.д.
багатокористувальницький направлений	UT передають ортогональний пілот-сигнал AP передає направлені дані AP передає направлений пілот-сигнал UT приймають за допомогою направленої пілот-сигналу	AP передає MIMO пілот-сигнал UT передає направлений пілот-сигнал UT передає направлені дані AP використовує CCMI, MMSE і т.д.
багатокористувальницький ненаправлений	AP передає MIMO пілот-сигнал UT передають швидкість для кожної AP антени AP передає дані через кожну антену UT використовують CCMI, MMSE і т.д.	UT передають ортогональний пілот-сигнал AP вибирають сумісні UT UT передають дані через кожну антену AP використовує CCMI, MMSE і т.д.

Для багатокористувальницького направленої режиму для передачі даних по низхідній лінії в одноантенні і/або багатоантенні користувальницькі термінали, користувальницькі термінали передають ортогональні пілот-сигнали по висхідній лінії, даючи можливість точці доступу оцінити відгук низхідного каналу. Одноантенний користувальницький термінал передає ненаправлений пілот-сигнал, а багатоантенний користувальницький термінал передає направлений пілот-сигнал. Точка доступу виводить напрямні вектори низхідної лінії, базуючись на ортогональних пілот-сигналах висхідної лінії, і використовує напрямні вектори для передачі направлених пілот-сигналів і направлених потоків символів даних у вибрані користувальницькі термінали. Кожний користувальницький термінал використовує направлений пілот-сигнал для прийому направленої потоку символів даних, переданої у даний користувальницький термінал. Для передачі даних по висхідній лінії від багатоантенних користувальницьких терміналів точка доступу передає MIMO пілот-сигнал. Кожний багатоантенний користувальницький термінал передає направлений пілот-сигнал і направлений потік символів даних по висхідній лінії. Точка доступу виконує просторову обробку у приймачі (наприклад, CCMI, MMSE і т.д.) для відновлення потоків символів даних.

Для багатокористувальницького ненаправленої режиму для передачі даних по низхідній лінії у багатоантенні користувальницькі термінали точка доступу передає MIMO пілот-сигнал по низхідній лінії. Кожний користувальницький термінал визначає і надсилає назад швидкість, з якою він може вести прийом від кожної антени у точці доступу. Точка доступу вибирає набір користувальницьких терміналів і передає потоки символів даних для вибраних користувальницьких терміналів через антени точки доступу. Кожний багатоантенний користувальницький термінал виконує просторову обробку у приймачі (наприклад, CCMI, MMSE і т.д.) для відновлення свого потоку символів даних. Для передачі даних по висхідній лінії від одноантенних і/або багатоантенних користувальницьких терміналів користувальницькі термінали передають ортогональні (ненаправлені) пілот-сигнали по висхідній лінії. Точка доступу оцінює відгук висхідного каналу, базуючись на пілот-сигналах висхідної лінії, і вибирає набір сумісних користувальницьких терміналів. Кожний вибраний користувальницький термінал передає потік символів даних через антену користувальницького термінала. Точка доступу виконує просторову обробку у приймачі (наприклад, CCMI, MMSE і т.д.) для відновлення потоків символів даних.

С. Вибір швидкості

Кожний потік даних для низхідної лінії і висхідної лінії передають по широкосмуговому просторовому каналу t , використовуючи один з режимів просторового мультиплексування. Кожний потік даних також передають на швидкості, яку вибирають таким чином, що для даного потоку може бути досягнутий цільовий рівень продуктивності (наприклад, 1 процент пакетних помилок (PER)). Швидкість для кожного потоку даних може бути визначена, базуючись на ССШ, що досягається у приймачі для цього потоку (тобто, ССШ при прийомі), де ССШ залежить від просторової обробки, що виконується у передавачі і приймачі, як описано вище.

В ілюстративній схемі вибору швидкості для визначення швидкості для широкосмугового просторового каналу m , спочатку одержують оцінку ССШ, $\gamma_m(k)$, (наприклад, в одиницях дБ) для кожного піддіапазону k широкосмугового просторового каналу, як описано вище. Потім обчислюють середнє ССШ, γ_{avg} , для широкосмугового просторового каналу m наступним чином:

$$\gamma_{avg,m} = \frac{1}{N_F} \sum_{k=1}^{N_F} \gamma_m(k) \quad \text{рівняння (40)}$$

Дисперсію оцінок ССШ, $\sigma_{\gamma_m}^2$, також обчислюють наступним чином:

$$\sigma_{\gamma_m}^2 = \frac{1}{N_F - 1} \sum_{k=1}^{N_F} (\gamma_m(k) - \gamma_{avg,m})^2 \quad \text{рівняння (41)}$$

Фактор запасу для ССШ, $\gamma_{bo,m}$, визначають, базуючись на функції $F(\gamma_{avg,m}, \sigma_{\gamma_m}^2)$ середнього ССШ і дисперсії ССШ. Наприклад, може бути використана функція $F(\gamma_{avg,m}, \sigma_{\gamma_m}^2) = K_b \cdot \sigma_{\gamma_m}^2$, де K_b є масштабуючим фактором, який може бути вибраний, базуючись на одній або декількох характеристиках MIMO системи, таких як перемишування, розмір пакету і/або схема кодування, використовувані для даного потоку даних. Фактор запасу ССШ враховує зміни ССШ у широкосмуговому просторовому каналі. Потім обчислюють робоче ССШ, $\gamma_{bo,m}$, для широкосмугового каналу m наступним чином:

$$\gamma_{op,m} = \gamma_{avg,m} \cdot \gamma_{bo,m} \quad \text{рівняння (42)}$$

Потім, базуючись на робочому ССШ, визначають швидкість для даного потоку даних. Наприклад, у таблиці перегляду (LUT) може зберігатися набір швидкостей, що підтримуються MIMO системою, і необхідні для них ССШ. Необхідне ССШ для кожної швидкості може бути визначене за допомогою комп'ютерного моделювання, емпіричних вимірювань і т.д., і базується на припущенні того, що канал є каналом AWGN. Найвищу швидкість у таблиці перегляду з необхідним ССШ, який дорівнює або менше робочого ССШ, вибирають як швидкість для потоку даних, який передається по широкосмуговому просторовому каналу m .

Також можуть бути використані інші схеми вибору швидкості.

D. Керування швидкістю із замкнутим контуром керування

Керування швидкістю із замкнутим контуром керування може бути використане для кожного потоку даних, що передається по множині широкосмугових просторових каналів. Керування швидкістю із замкнутим контуром керування може бути виконане за допомогою одного або множини контурів.

На Фіг.10 показана блок-схема варіанту здійснення механізму 1000 керування швидкістю із замкнутим контуром керування, який містить внутрішній контур 1010, який працює сумісно із зовнішнім контуром 1020. Внутрішній контур 1010 виконує оцінку стану каналу і визначає швидкість, підтримувану кожним широкосмуговим просторовим каналом. Зовнішній контур 1020 виконує оцінку якості передачі даних, прийнятих по кожному широкосмуговому просторовому каналу, і відповідно настраює роботу внутрішнього контуру. Для простоти, робота контурів 1010 і 1020 показана на Фіг.10 і описана нижче для одного низхідного широкосмугового просторового каналу t .

Для внутрішнього контуру 1010 пристрій 378 оцінки каналу у користувальницькому терміналі 120 виконує оцінку широкосмугового просторового каналу m і надає оцінки каналу (наприклад, оцінки посилення каналу і оцінку дисперсії шуму). Пристрій 1030 вибору швидкості у контролері 380 визначає швидкість, підтримувану широкосмуговим просторовим каналом t , базуючись на (1) оцінках каналу з пристроєм 378 оцінки каналу, (2) факторі запасу ССШ і/або настройці швидкості для широкосмугового просторового каналу m з пристроєм 1032 оцінки якості і (3) таблиці перегляду (LUT) 1036 швидкостей, підтримуваних MIMO системою, і ССШ, необхідних для них. Підтримувані швидкості для широкосмугового просторового каналу m відправляються контролером 380 у точку 110 доступу. У точці 110 доступу контролер 330 приймає підтримувану швидкість для широкосмугового просторового каналу m і визначає сигнали керування швидкістю передачі даних, кодуванням і модулюванням для потоку даних, призначеного для передачі по цьому просторовому каналу. Потім потік даних обробляють відповідно до цих сигналів керування у TX процесорі 310 даних, піддають просторовій обробці і мультиплексують з пілотними символами у TX просторовому процесорі 320, обробляють у модуляторі 322 і передають у користувальницький термінал 120.

Зовнішній контур 1020 виконує оцінку якості потоку декодованих даних, прийнятих по широкосмуговому просторовому каналу m , і настраює роботу внутрішнього контуру 1010. Прийняті символи для широкосмугового просторового каналу m піддаються просторовій обробці в RX просторовому процесорі 360 і далі обробляються RX процесором 370 даних. RX процесор 370 даних надає статус кожного пакету, прийнятого по широкосмуговому просторовому каналу m і/або метрику декодера у пристрій 1032 оцінки якості. Зовнішній контур 1020 може забезпечувати різні типи інформації (наприклад, фактор запасу ССШ, настройка швидкості і т.д.), використовувані для керування роботою внутрішнього контуру 1010.

Керування швидкістю замкнутим контуром керування, описане вище, може таким чином виконуватися незалежно для кожного низхідного і висхідного широкосмугового просторового каналу, який може відповідати (1) широкосмуговій власній моді для однокористувальницького направленої режиму або (2) передавальній антені для однокористувальницького і багатокористувальницького ненаправлених режимів.

Е. Планування користувальницьких терміналів

На Фіг.11 показана блок-схема варіанту здійснення контролера 330 і планувальника 334 для планування користувальницьких терміналів для передачі даних по низхідній лінії і висхідній лінії. У контролері 330 процесор 1110 запитів одержує запити на доступ, що передаються користувальницьким терміналом 120 по RACH, і, можливо, запити на доступ від інших джерел. Такі запити на доступ призначені для передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії. Процесор 1110 запиту обробляє одержані запити на доступ і надає ідентифікатори (ID) і статуси всіх запитуючих користувальницьких терміналів. Статус для користувальницького терміналу може вказувати кількість антен доступних у даному терміналі, чи відкалібрований даний термінал, і т.д.

Селектор 1120 швидкості приймає оцінки каналів від пристрою оцінки каналів 328 і визначає швидкості, підтримувані широкосмуговими просторовими каналами висхідної лінії і/або низхідної лінії для запитуючих користувальницьких терміналів, як описано вище. Для низхідної лінії кожний користувальницький термінал 120 може визначити швидкість, підтримувану кожним його широкосмуговим просторовим каналом, як описано вище. Підтримувана швидкість є максимальною швидкістю, яка може бути використана для передачі даних по широкосмуговому просторовому каналу для досягнення цільового рівня виконання. Кожний користувальницький термінал 120 може надсилати підтримувані швидкості для всіх своїх широкосмугових просторових каналів низхідної лінії у точку 110 доступу, наприклад, через RACH. Як альтернатива, точка 110 доступу може визначати підтримувані швидкості для широкосмугових просторових каналів низхідної лінії, якщо (1) низхідна лінія і висхідна лінія є взаємооберненими і (2) точці 110 доступу надається дисперсія шуму або рівень шуму у користувальницькому терміналі 120. Для висхідної лінії точка 110 доступу може визначати підтримувану швидкість для кожного широкосмугового просторового каналу для кожного запитуючого користувальницького терміналу 120.

Селектор 1140 користувача вибирає різні набори з одного або декількох терміналів з усіх запитуючих терміналів для можливої передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії. Користувальницькі термінали можуть бути вибрані, виходячи з різних критеріїв, таких як вимоги системи, можливості користувальницьких терміналів і підтримувані швидкості, пріоритет користувача, кількість даних, призначених для відправки, і т.д. Для багатокористувальницьких режимів просторового мультиплексування користувальницькі термінали для кожного набору також можуть вибиратися, базуючись на їх векторах відгуків каналів.

Селектор 1130 режиму вибирає конкретний режим просторового мультиплексування для використання для кожного набору користувальницьких терміналів, виходячи з робочого стану і можливостей користувальницьких терміналів у наборі і, можливо, інших факторів. Наприклад, однокористувальницький направлений режим може бути використаний для "каліброваного" багатоантенного користувальницького терміналу, який виконав калібрування таким чином, що відгук каналу для однієї лінії (наприклад, низхідної лінії) може бути оцінений, базуючись на (наприклад, направленої) пілот-сигналі одержаному по іншій лінії (наприклад, висхідній лінії). Однокористувальницький ненаправлений режим може бути використаний для "некаліброваного" багатоантенного користувальницького терміналу, який не виконав калібрування або не може підтримувати однокористувальницький направлений режим з якої-небудь причини. Багатокористувальницький направлений режим може бути використаний для передачі по низхідній лінії у множину користувальницьких терміналів, кожний з яких обладнаний однією або декількома антенами. Багатокористувальницький ненаправлений режим може бути використаний для передачі по висхідній лінії множиною користувальницьких терміналів.

Планувальник 334 приймає набори користувальницьких терміналів з селектора 1140 користувача, вибраний режим просторового мультиплексування для кожного набору користувальницьких терміналів з селектора 1130 режиму і вибрані швидкості для кожного набору користувальницьких терміналів з селектора 1120 швидкості. Планувальник 334 планує користувальницькі термінали для передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії. Планувальник 334 вибирає один або декілька наборів користувальницьких терміналів для передачі даних по низхідній лінії і один або декілька наборів користувальницьких терміналів для передачі даних по висхідній лінії для кожного TDD кадру. Кожний набір включає один або декілька користувальницьких терміналів і планується для передачі даних паралельно у призначеному інтервалі передачі у TDD кадрі.

Планувальник 334 формує елемент інформації (IE) для кожного користувальницького терміналу, запланованого для передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії. Кожний елемент інформації включає (1) режим просторового мультиплексування для використання для передачі даних, (2) швидкість для використання для потоку даних, що надсилається по кожному широкосмуговому просторовому каналу, (3) початок і тривалість передачі даних, і (4) можливо, іншу інформацію (наприклад, тип пілот-сигналу, призначеного для передачі спільно з передачею даних). Планувальник 334 надсилає елементи інформації для всіх запланованих користувальницьких терміналів через FACH. Кожний користувальницький термінал обробляє FACH для відновлення свого елемента інформації, і потім приймає передачу по низхідній лінії і/або надсилає передачу по висхідній лінії відповідно до одержаної інформації планувальника.

На Фіг.11 показаний варіант здійснення планування користувальницьких терміналів для передачі даних, якщо підтримуються режими просторового мультиплексування. Планування може виконуватися іншими способами, і це знаходиться у межах об'єму даного винаходу.

На Фіг.12 показана блок-схема послідовності операцій процесу 1200 планування користувальницьких терміналів для передачі даних у MIMO системі 100. Набір, щонайменше, з одного користувальницького терміналу вибирають для передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії (блок 1212). Для набору користувальницьких терміналів вибирають режим просторового мультиплексування з множини режимів просторового мультиплексування, що підтримуються даною системою (блок 1214). Також для набору користувальницьких терміналів вибирають множини швидкостей для множини потоків даних, призначених для передачі через множини просторових каналів (блок 1216). Набір користувальницьких терміналів планують для передачі даних по низхідній лінії і/або висхідній лінії з вибраними швидкостями і вибраним режимом просторового мультиплексування (блок 1218).

На Фіг.13 показана блок-схема послідовності операцій процесу 1300 передачі даних по низхідній лінії у MIMO системі 100. Процес 1300 може виконуватися точкою 110х доступу. Першу множину потоків даних кодують і модулюють відповідно до першого набору швидкостей для одержання першої множини потоків символів даних (блок 1312). У випадку однокористувальницького направленої режиму для першої множини потоків символів даних виконують просторову обробку за допомогою першої множини напрямних векторів для одержання першої множини потоків символів передачі для передачі через множини антен у перший користувальницький термінал у першому інтервалі передачі (блок 1314). Перший набір напрямних векторів виводять таким чином, що першу множину потоків даних передають по ортогональних просторових каналах у перший користувальницький термінал. Другу множину потоків даних кодують і модулюють відповідно до другої множини швидкостей для одержання другої множини потоків символів даних (блок 1316). Для однокористувальницького ненаправленого режиму другу множину потоків символів даних надають як другу множину потоків символів передачі для передачі через множини антен у другий користувальницький термінал у другому інтервалі передачі (блок 1318). Третю множину потоків даних кодують і модулюють для одержання третьої множини потоків символів даних (блок 1320). У випадку багатокористувальницького направленої режиму для третьої множини потоків символів даних виконують просторову обробку за допомогою другої множини напрямних векторів для одержання третьої множини потоків символів передачі для передачі через множини антен у множини користувальницьких терміналів у третьому інтервалі передачі (блок 1322). Другу множину напрямних векторів виводять таким чином, що третю множину потоків символів даних у множині користувальницьких термі-

налів приймають з придушеними перехресними перешкодами.

На Фіг.14 показана блок-схема послідовності операцій процесу 1400 прийому даних по висхідній лінії у MIMO системі 100. Процес 1400 також може виконуватися точкою 110х доступу. Просторову обробку у приймачі виконують для першої множини потоків прийнятих символів відповідно до першого режиму просторового мультиплексування (наприклад, однокористувальницьким направленим режимом) для одержання першої множини потоків відновлених символів даних (блок 1412). Першу множину потоків відновлених символів даних демодулюють і декодують відповідно до першої множини швидкостей для одержання першої множини потоків декодованих даних (блок 1414). Просторову обробку у приймачі виконують для другої множини потоків прийнятих символів відповідно до другого режиму просторового мультиплексування (наприклад, ненаправленим режимом) для одержання другої множини потоків відновлених символів даних (блок 1416). Другу множину потоків відновлених символів даних демодулюють і декодують відповідно до другої множини швидкостей для одержання другої множини потоків декодованих даних, які є оцінками потоків даних, що передаються одним або множиною користувальницьких терміналів (блок 1418).

Кожний користувальницький термінал виконує відповідні операції при передачі даних по одному або декількох висхідних широкосмугових просторових каналах і при прийомі даних по одному або декількох низхідних широкосмугових просторових каналах.

Передача даних з використанням декількох режимів просторового мультиплексування, викладена у даному описі, може бути реалізована за допомогою різних засобів. Наприклад, обробка може бути реалізована у вигляді апаратних засобів, програмних засобів або їх комбінації. У випадку реалізації у вигляді апаратних засобів, елементи, використовувані для виконання обробки даних, просторової обробки і планування у точці доступу, можуть бути реалізовані в одній або декількох орієнтованих на додаток інтегральних схемах (ASIC), цифрових сигнальних процесорах (DSP), цифрових сигнальних процесорних пристроях (DSPD), програмованих логічних пристроях (PLD), внутрішньо-схемно програмованих вентильних матрицях (FPGA), процесорах, контролерах, мікроконтролерах, інших електронних блоках, виконаних з можливістю виконання функцій, викладених у даному описі або їх комбінації. Блоки обробки у користувальницькому терміналі також можуть бути реалізовані в одній або декількох ASIC, DSP і т.д.

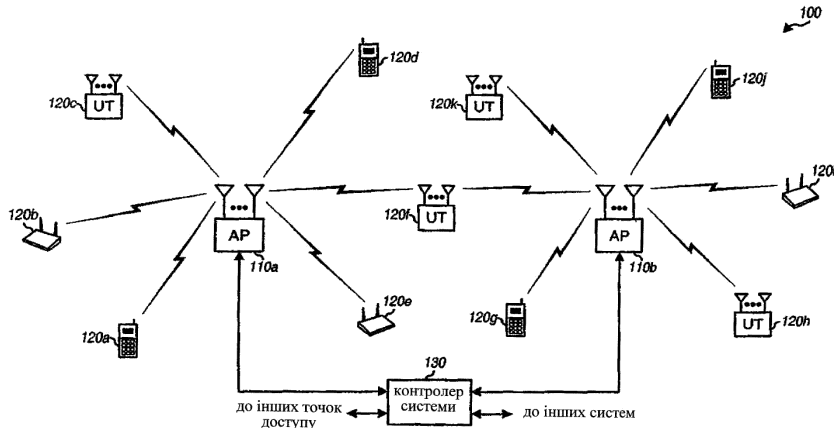
У випадку здійснення у вигляді програмних засобів, обробка у точці доступу і користувальницькому терміналі при передачі даних з використанням декількох режимів просторового мультиплексування, може бути реалізована за допомогою модулів (наприклад, процедур, функцій і т.д.), які виконують функції, викладені у даному описі. Програмні коди можуть зберігатися у запам'ятовуючому пристрої (наприклад, запам'ятовуючих пристроях 332 і 382 за Фіг.8) і виконуватися процесором (наприклад, контролерами 330 і 380).

Запам'ятовуючий пристрій може бути виконаний у процесорі або як зовнішній по відношенню до процесора.

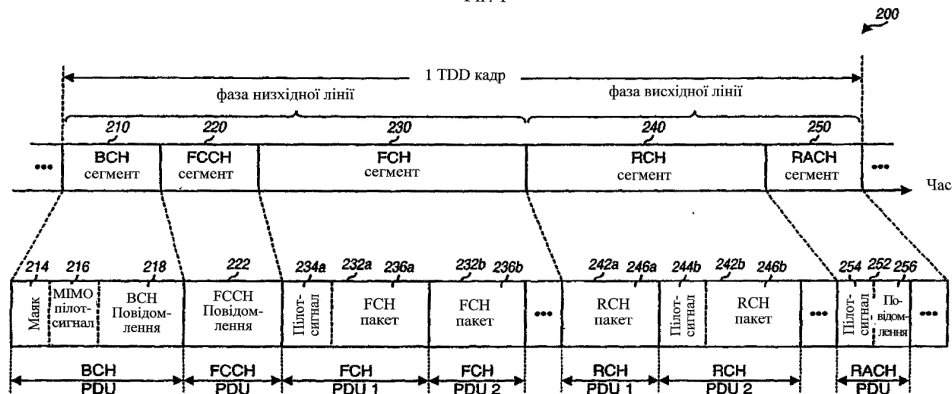
Заголовки включені у даний опис для посилення і для допомоги у пошуку визначених розділів. Вказані заголовки не слід розглядати як такі, що обмежують об'єм концепцій в озаглавлених ними розділах, і ці концепції можуть застосовуватися в інших розділах по всьому опису.

Наведений вище опис розкритих варіантів здійснення представлений для того, щоб дати можливість будь-якому фахівцеві у даній галузі техні-

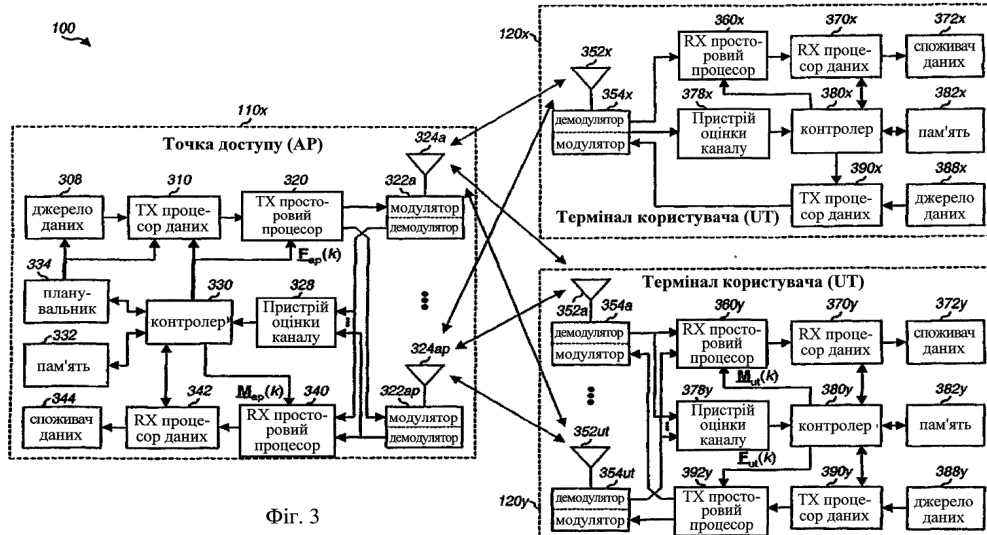
ки використовувати даний винахід. Різні модифікації відносно вказаних варіантів здійснення повинні бути очевидні для фахівців у даній галузі техніки, і загальні принципи, викладені у даному описі, застосовні до інших варіантів здійснення без відходу від суті і об'єму даного винаходу, таким чином, даний винахід не обмежується варіантами здійснення, розкритими у даному описі, а навпаки, відповідає найширшому об'єму, сумісному з принципами і новими відмітними особливостями, розкритими у даному описі.



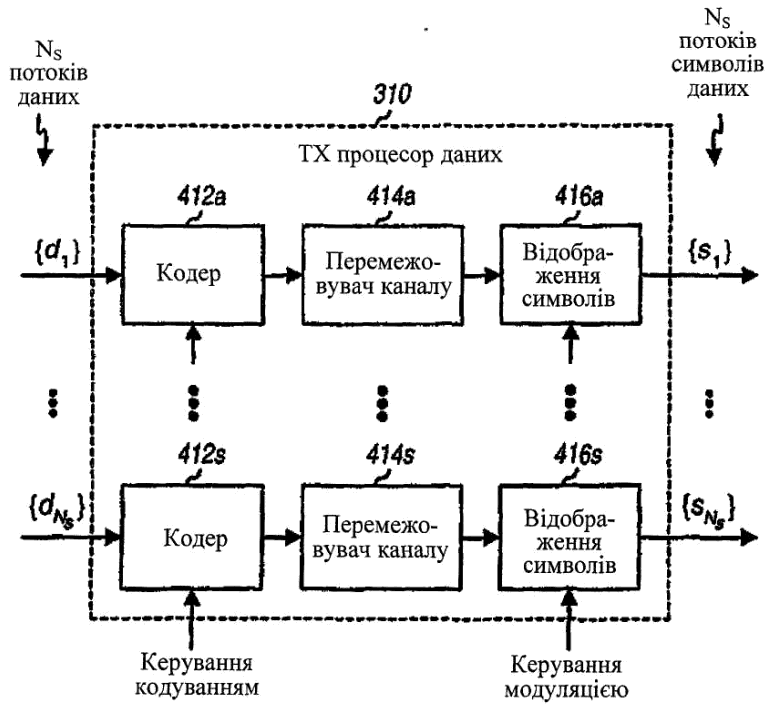
Фіг. 1



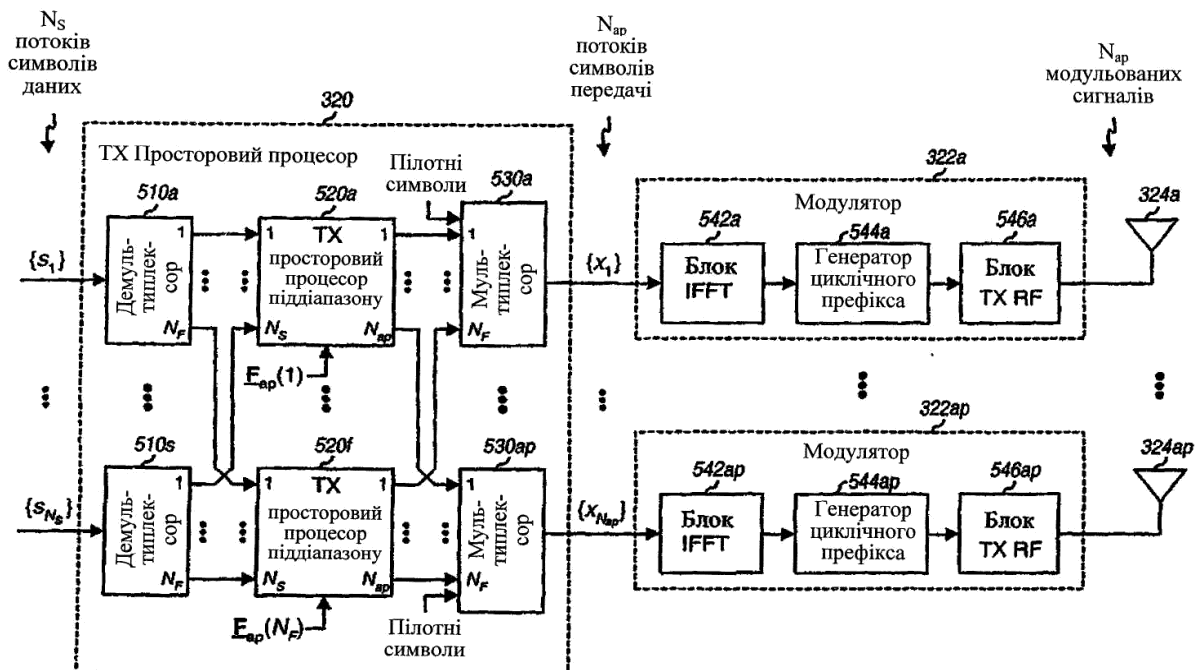
Фіг. 2



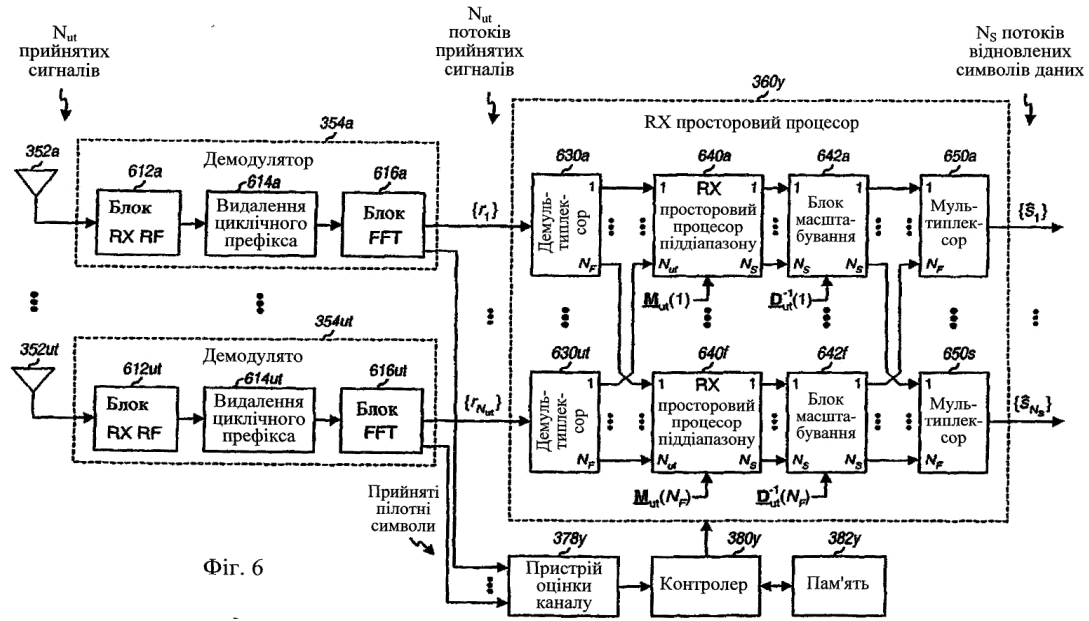
Фіг. 3



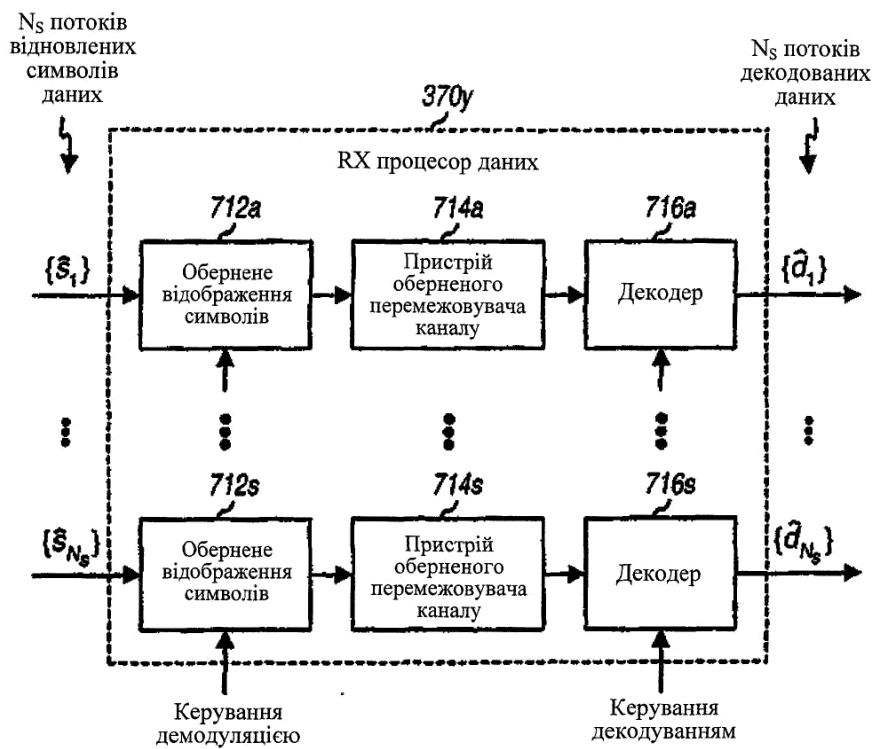
Фіг. 4



Фіг. 5



Фіг. 6



Фіг. 7

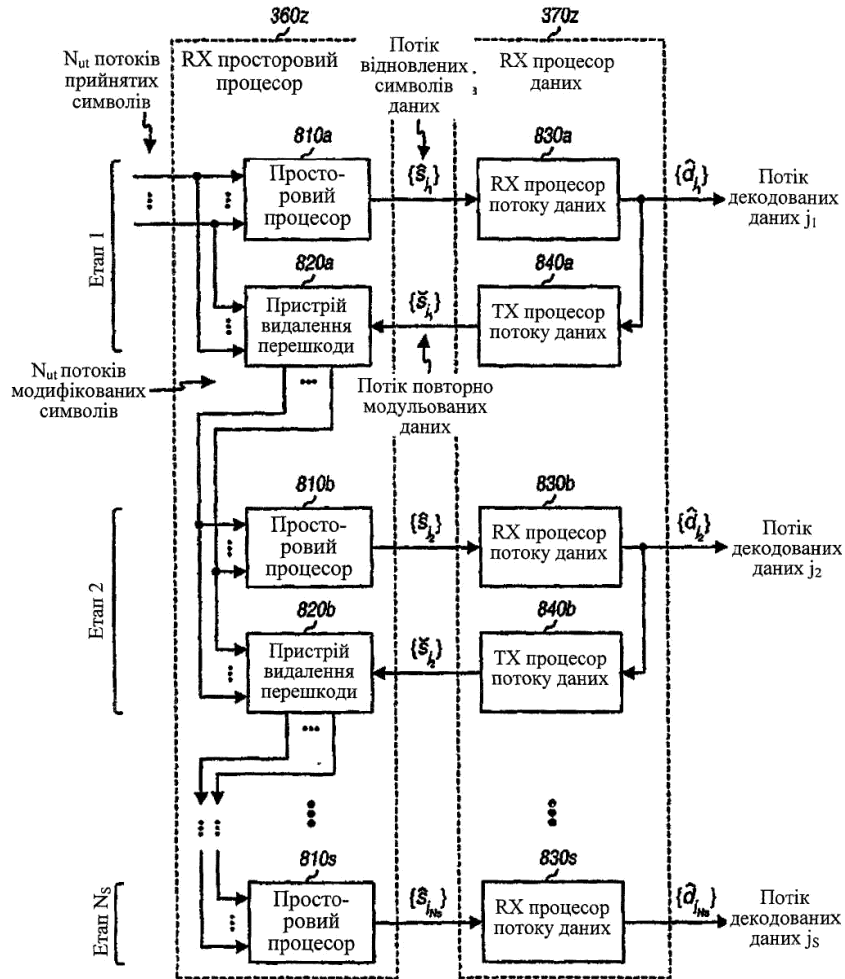


Fig. 8

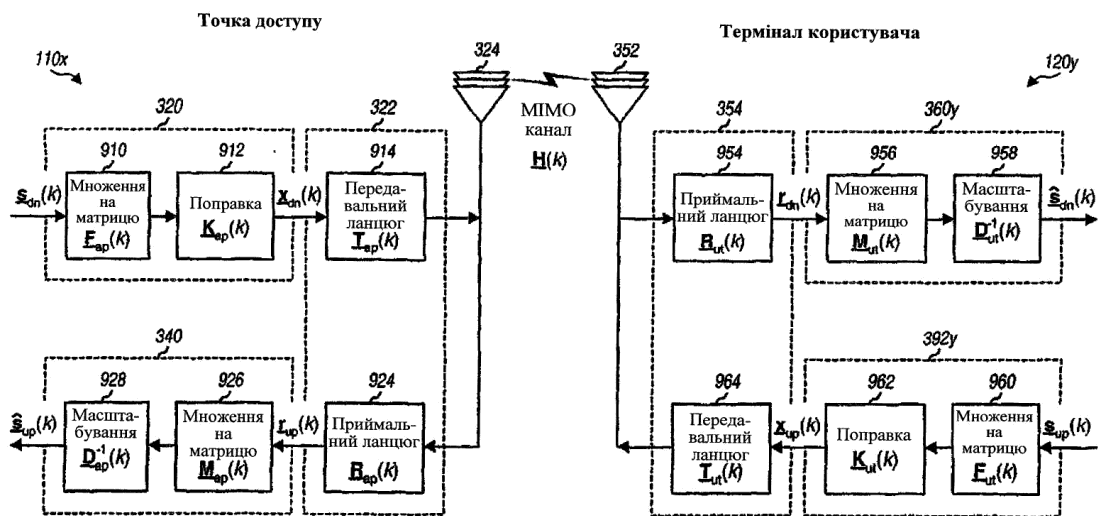
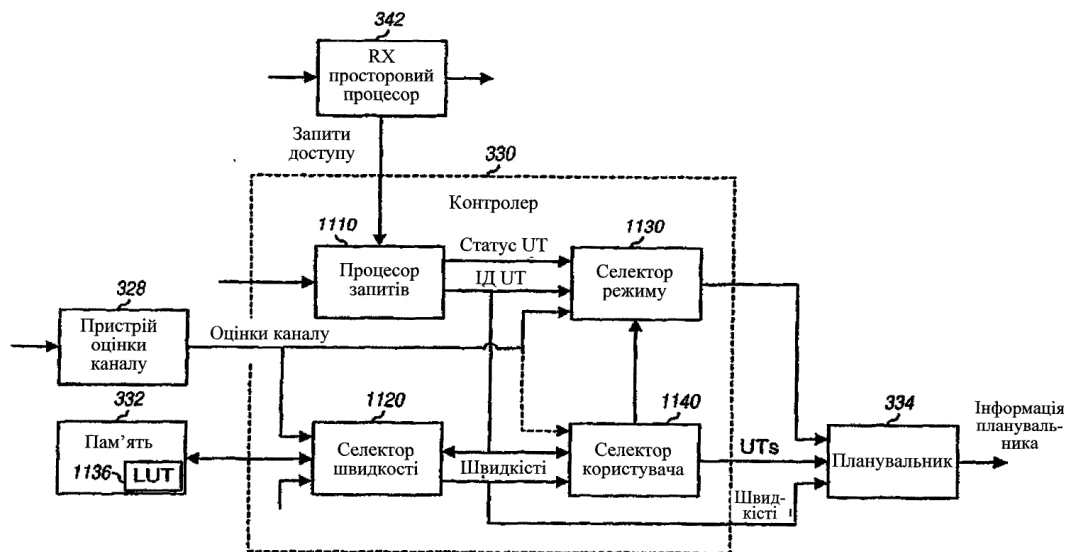
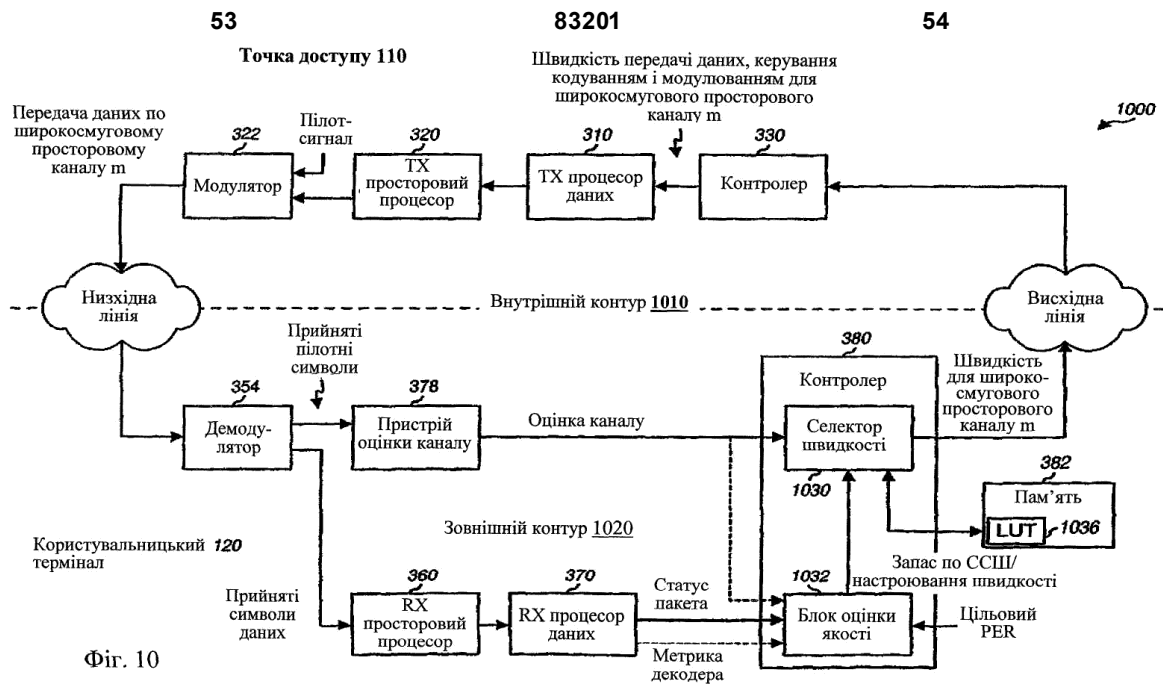
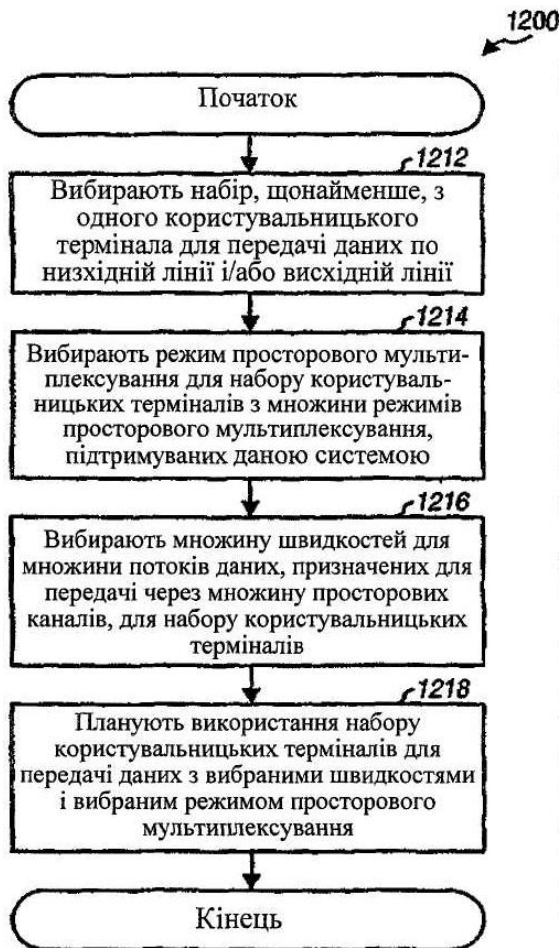
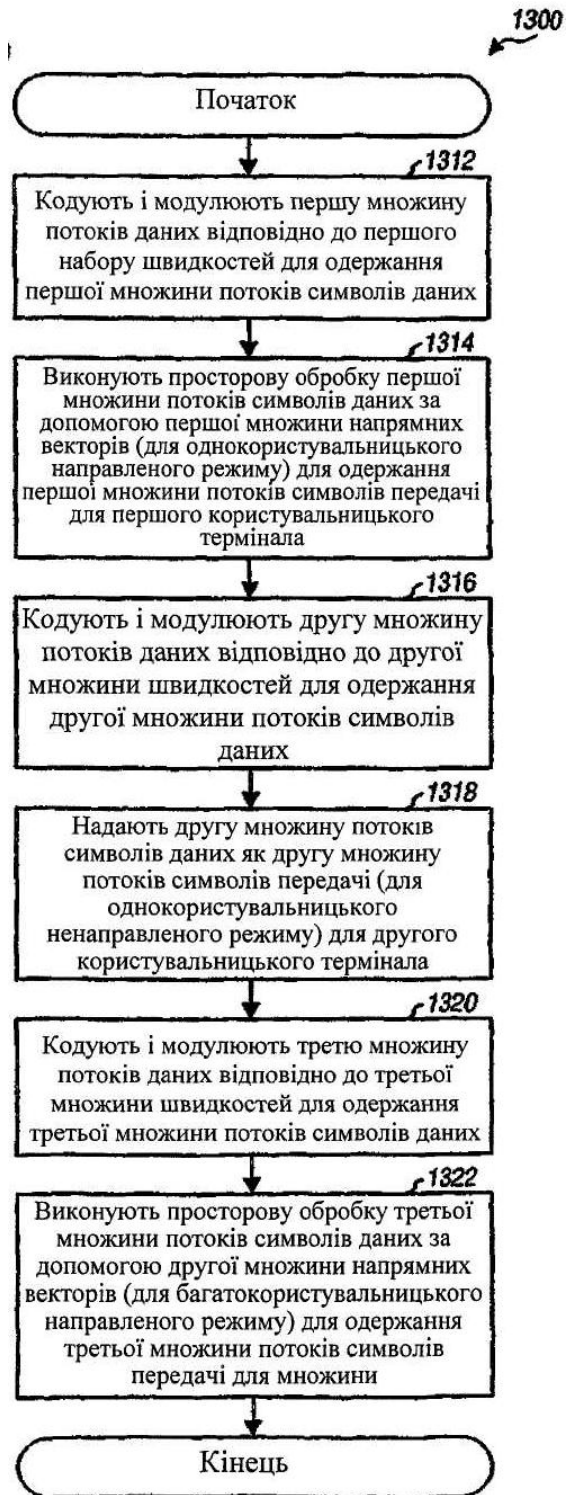


Fig. 9

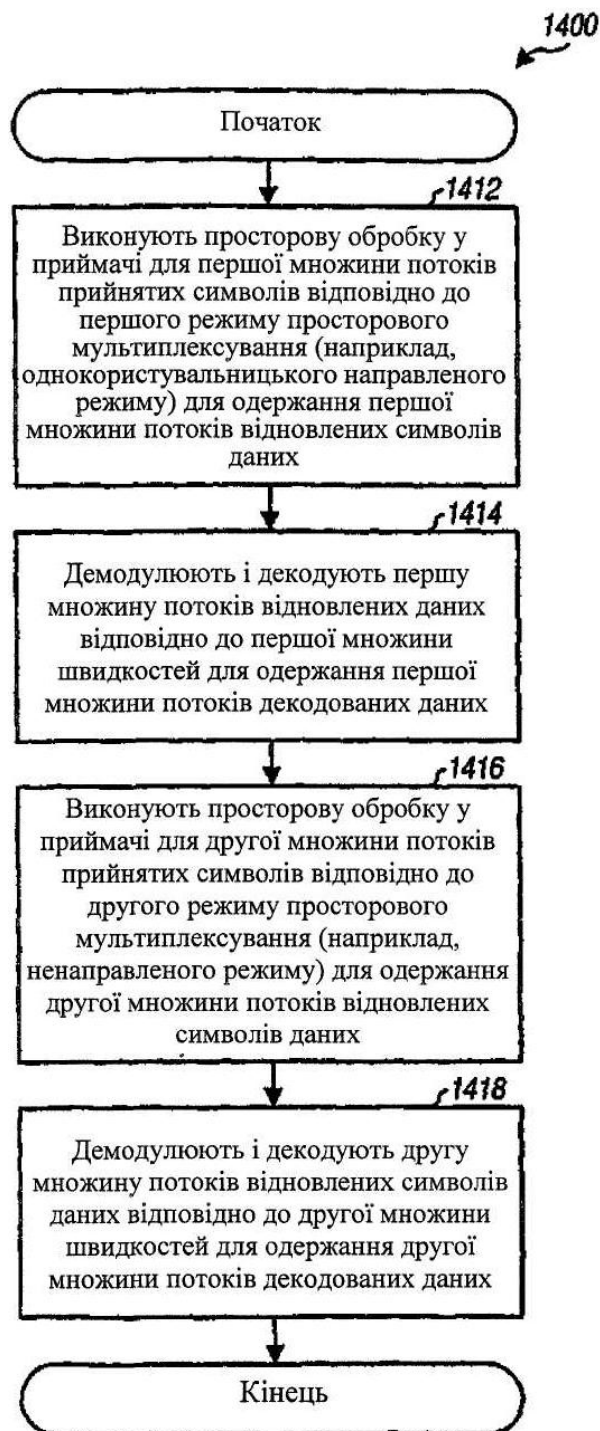




Фіг. 12



Фіг. 13



Фіг. 14