

УДК 621.396

**АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ ПОБУДОВИ ГІГАБІТНОГО МОДЕМА
ДЛЯ РАДІОРЕЛЕЙНИХ ЛІНІЙ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

Наритник Т.М., Лутчак О.В.

*СП «Інститут електроніки та зв'язку УАННП»
пр. Л. Курбаса, 2-Б, Київ, Україна, 03148
director@mitris.com*

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИГАБИТНОГО
МОДЕМА ДЛЯ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Нарытник Т.Н., Лутчак А.В.

*СП «Институт электроники и связи УАННП»
пр. Л. Курбаса, 2-Б, Киев, Украина, 03148
director@mitris.com*

**HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR CONSTRUCTION GIGABIT
MODEM FOR RADIO-RELAY LINES IN THE TERAHERTZ RANGE**

Narytnik T. M., Lutchak O.V.

*JV «Institute of electronics and communication UANNP»
the Avenue L. Kurbas, 2-B, Kiev, Ukraine, 03148
director@mitris.com*

Анотація. Надано результати проведених досліджень і розробки на цій основі нового технічного рішення щодо створення приймально-передавального формувача (модема) для цифрової радіорелейної системи у терагерцовому діапазоні, тестування й оптимізації налаштувань двох зразків модема на максимальну пропускну здатність, а також оптимізації швидкісних параметрів за допомогою створених допоміжних програмних інструментів.

Ключові слова: гігабітний модем, цифрова радіорелейна станція, терагерцовий діапазон, пропускну здатність, апаратно-програмне рішення.

Аннотация. Даны результаты проведённых исследований и разработки на этой основе нового технического решения по созданию приёмно-передающего формирователя (модема) для цифровой радиорелейной системы в терагерцовом диапазоне, тестирования и оптимизации настроек двух образцов модема на максимальную пропускную способность, а также оптимизации скоростных параметров с помощью созданных вспомогательных программных инструментов.

Ключевые слова: гигабитный модем, цифровая радиорелейная станция, терагерцовый диапазон, пропускная способность, аппаратно-программное решение.

Abstract. The results of the conducted research and development on this basis of new technical solutions for the creation transceiver driver-modem (the modem) for digital radio-relay systems in the terahertz range, testing and optimization of the settings of two samples modem for maximum throughput and optimization of high-speed parameters, using auxiliary software tools.

Key words: Gigabit modem, digital radio-relay station, terahertz range, bandwidth, hardware and software solution

ВСТУП

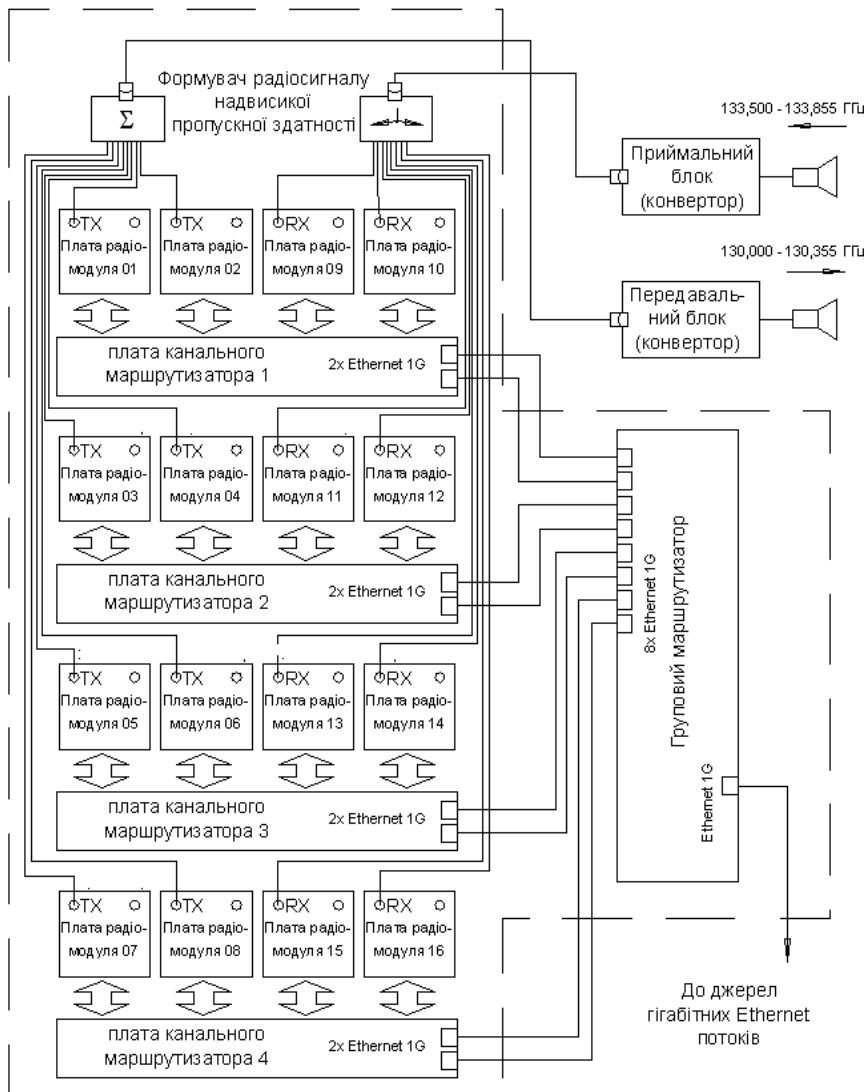
Задача створення на базі сучасних досягнень у галузі інфокомунікацій модема з підвищеною пропускну здатністю (до 2,4 Гбіт/с) та низькою вартістю, що дозволить використання його як в магістральних каналах передачі, так і системах мультисервісного доступу, вирішується тим, що використовується частотне мультиплексування кількох каналів. При цьому окремі канали можуть мати меншу швидкість, наприклад, 0,15 Гбіт/с [1-3].

Таке технічне рішення базується на використанні елементів у вигляді чіпа, що масово випускається у серійному виробництві і застосовується в мережах Wi-Fi. Це, наприклад, блок модуляторів-демодуляторів Mikrotik R52nM, який дозволяє отримати у смузі частот 40 МГц

швидкість у прямому та зворотному каналах по 150 Мбіт/с. Вхід передавальної та вихід приймальної схем у складі даного чіпа – бітовий потік у форматі Ethernet, а вихід передавальної та вхід приймальної схем у складі даного чіпа – символний потік на частотах у діапазонах близько 2 або 5 ГГц. Модуляція та демодуляція може програмно перебудовуватися від BPSK до QAM-64.

Підвищення спектральної ефективності досягається використанням багатопозиційної модуляції (QAM-64). Подальше підвищення швидкості в каналі зв'язку досягається створенням блока, що виконує кодування і модуляцію потоку у форматі Ethernet із розподілом по суміжних частотних смугах та об'єднанні їх у загальний багаточастотний потік у передавальній частині та розподілу по вихідних частотних смугах із подальшою їх демодуляцією, маршрутизацією та формуванням Ethernet інтерфейсу в приймальній частині. Результуюча (сумарна) швидкість при створенні восьми частотних потоків при модуляції QAM-64 складе 1200 Мбіт/с в кожному напрямку. Сумарна смуга з урахуванням захисних частотних інтервалів (ширини смуги фільтрів, що обмежують смугу кожного потоку) складе менше 400 МГц.

СТРУКТУРНА СХЕМА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДЕМА. На основі проведеного аналізу наявної радіоелектронної бази визначено, що для модуляції потоку 1G Ethernet необхідно буде не менше 8 модуляторів зі схемами об'єднання. В роботі використано частотне мультиплексування каналів (рисунок 1) зі швидкістю модуляції 155 Мбіт/с в кожному.



Принцип роботи й основні параметри модема надвисокої (2,4 Гбіт/с) пропускної здатності наступний. Плати радіомодулів 01–08 і суматор формують груповий сигнал прямого каналу, який буде складатися з восьми спектрів, смугою 40 МГц, і відстанню між центральними частотами 60 МГц. Груповий сигнал діапазону 2,202–2,642 ГГц подається на передавальний блок (конвертор), який переносить його в діапазон 130,000–130,355 ГГц. Пропускна здатність прямого каналу 8×150 Мбіт/с = 1,2 Гбіт/с. Сигнали зворотного каналу діапазону 133,500–133,855 ГГц приймаються і переносяться приймальним конвертором в діапазон 2,202–2,642 ГГц. Пропускна здатність зворотного каналу 8×150 Мбіт/с = 1,2 Гбіт/с.

Рисунок 1 – Структурна схема модема надвисокої (2,4 Гбіт/с) пропускної здатності

ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕМА. Проектування модема базується на використанні технічного рішення щодо створення приймально-передавального формувача інформаційного потоку на загальну каналну швидкість 1,2 Гбіт/с. Така швидкість досягається при використанні 8 приймачів Wi-Fi стандарту 802.11 n в діапазоні 2,202–2,642 ГГц у смузі по 40 МГц кожен, що мають каналну швидкість до 150 Мбіт/с (рис. 2).

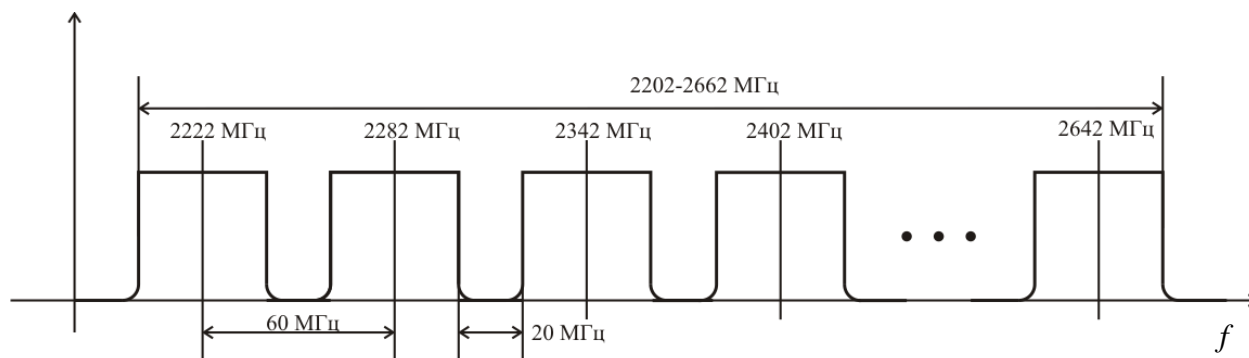


Рисунок 2 – Частотний план модема

Для організації дуплексних каналів та підвищення ефективності кожного каналу застосовується режим dual nstream на обладнанні Mikrotik, що використовує для створення одного дуплексного радіоканалу два приймачі R52n-M, один на приймання, інший на передавання. Для досягнення сумарної каналної швидкості 1,2 Гбіт/с пропонується чотири дуплексних канали по 150 Мбіт/с у кожному напрямку.

Для формування dual nstream каналів використовуються маршрутизатори Mikrotik RB800, що мають по чотири mini-PCI слоти з встановленими приймачами-передавачами Mikrotik R52n-M, і утворюючи два дуплексних канали. Доступ до кожного радіоканалу забезпечується окремим інтерфейсом Ethernet маршрутизатора RB800.

Для об'єднання всіх каналів використовується маршрутизатор Mikrotik RB1100Nx2, агрегуючи канали в режимі bonding і надаючи єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення. Дана конфігурація забезпечує продуктивність і заявлені характеристики, маючи при цьому відносно низьку вартість побудови модема. Також забезпечується простір для нарощування каналної швидкості модема аж до 1,2 Гбіт/с у кожному напрямку, у разі подвоєння кількості комплектів маршрутизаторів RB800 і приймачів Mikrotik R52n-M.

Для зв'язку передавального та приймального трактів з формувачами групових сигналів було розроблено по дільник та суматор сигналів, які конструктивно входять до складу формувачів групових сигналів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІГАБІТНОГО МОДЕМА. Для проведення випробувань гігабітного модема, тестування й оптимізації налаштувань двох лабораторних зразків модема на максимальну пропускну здатність, а також для проведення оптимізації швидкісних параметрів розроблено випробувальний стенд. Модем з каналною швидкістю 1,2 Гбіт/с був налаштований в дуплексному режимі за спрощеною схемою, тобто не в повній, а в половинній конфігурації. Для об'єднання всіх каналів використовується агрегація каналів у режимі bonding. Цей метод надає єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення і забезпечує продуктивність і можливість нарощування каналної швидкості модема аж до 1,2 Гбіт/с у кожному напрямку у разі подвоєння їх кількості, тобто при реалізації повної конфігурації.

До складу стенда (рис. 3) входять два модеми, що утворюють між собою двосторонню радіолінію. Виходи каналних передавачів маршрутизаторів кожного модема надходять на свій суматор і далі на подільник протилежного модема.

Випробовуваний модем № 2 підключається крученою (витою) парою до робочої станції оператора, який проводить випробування і контролює параметри за допомогою програмного забезпечення WinBox. Відповідний модем № 1 укомплектований більш дешевим агре-

гувальним маршрутизатором RB750 або RB450G, якого достатньо для тестування до 4 радіо-каналів.

Випробування пропускної здатності проводяться в програмі WinBox «Bandwidth Test», підключившись до маршрутизатора RB1100Hx2 модема № 2, при цьому тестування здійснюється через інтерфейс агрегації радіоканалів до агрегуювального маршрутизатора модема № 1.

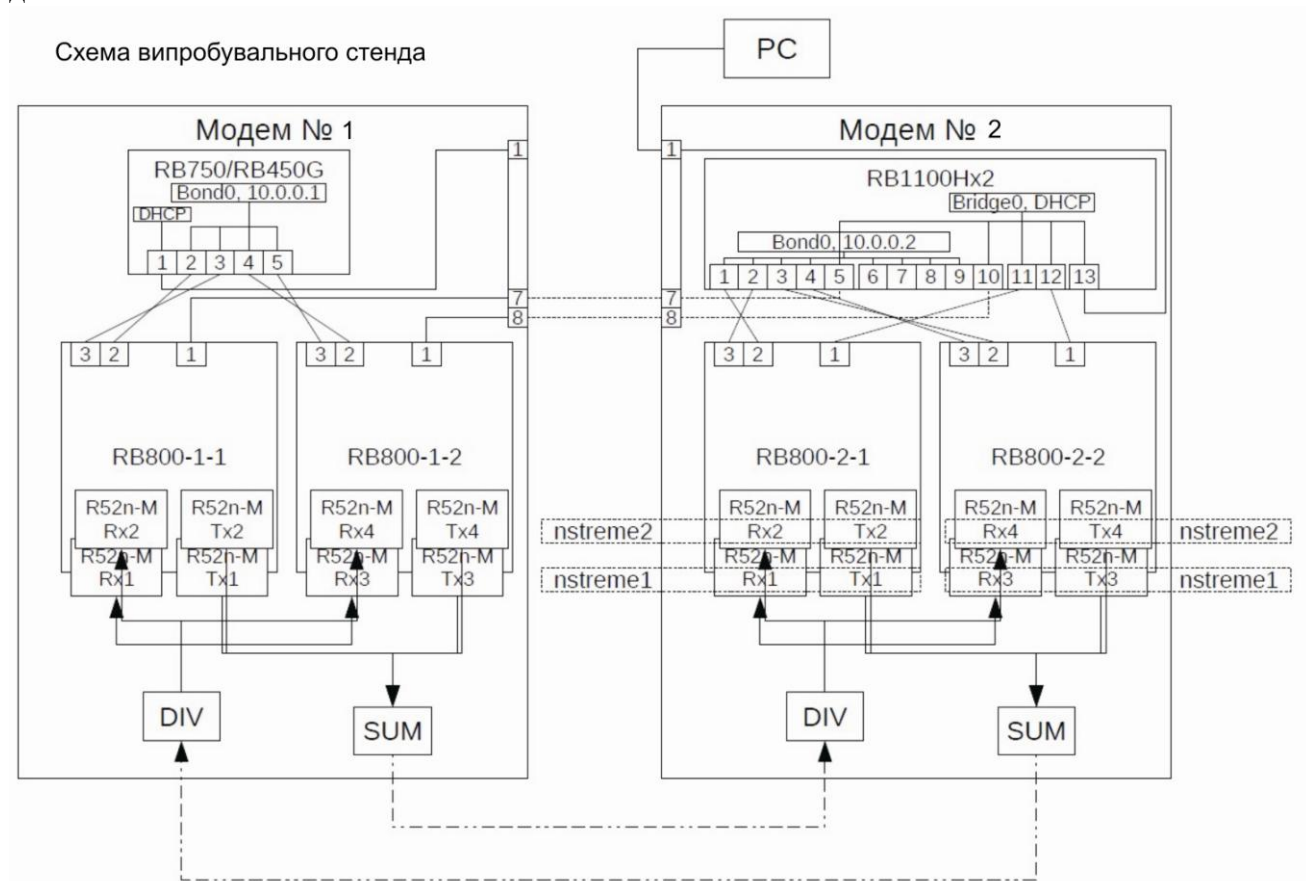


Рисунок 3- Структурна схема випробувального стенда

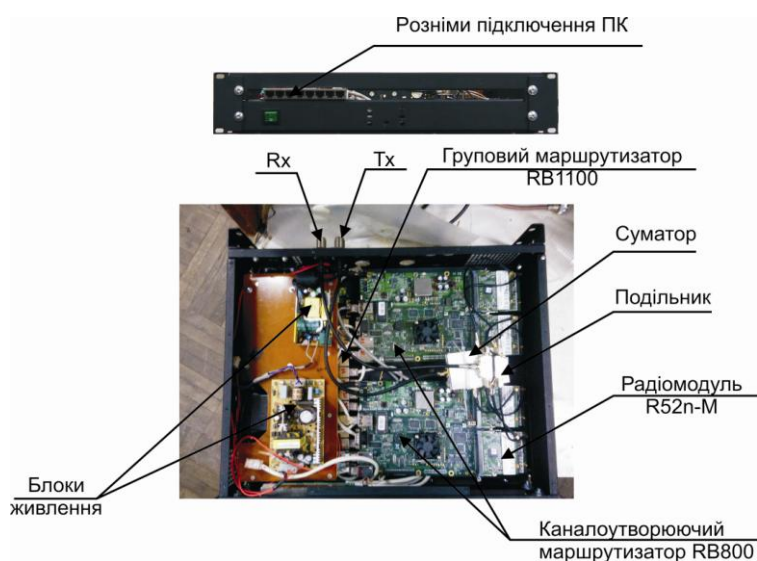


Рисунок 4 – Фото лабораторного зразка гігабітного модема

Конфігурація агрегуювальних маршрутизаторів задається одноразово при первинному налаштуванні. Конфігурація каналотворювальних маршрутизаторів RB800 для цілей випробування задається динамічно за допомогою розробленої програми, яка на базі параметризованого шаблону конфігурації створює необхідні файли налаштування, а потім одночасно застосовує ці налаштування на всіх маршрутизаторах комплексу, використовуючи інтерфейси керування.

Динамічне створення та автоматичне застосування параметрів дозволило швидко провести тестування і підібрати параметри, що максимізують фактичну швидкість модема.

Досліджувалися фактичні швидкості каналів у повно- і напівдуплексних передачах і ефективність агрегації каналів, використовуючи різні агрегувальні маршрутизатори в модемі зворотної частини радіосистеми.

Вимірювання проводилися на основному агрегувальному маршрутизаторі RB1100Hx2, використовувався вбудований тест «Bandwidth Test» операційної системи Mikrotik RouterOS в режимі UDP з пакетами 1500 байт. Результати випробувань гігабітних (Алиев М.Я.) модемів (рис. 4) показані в табл. 1. (Н.) (Н., Исследование формирователя цифрового потока для телекоммуникационных систем терагерцового диапазона)

Таблица 1 – Результаты лабораторных испытаний гигабитных модемов

Відповідний маршрутизатор	Кількість каналів dual nstreme	Режим дуплекса	Канальна швидкість в одному напрямі (Мбіт/с)	Загальна канальна швидкість в двох напрямках (Мбіт/с)	Практична швидкість прийому/передачі (Мбіт/с)	Загальна практична швидкість (Мбіт/с)
rb450g	1	RX	150		116	
rb450g	1	TX	150		116	
rb450g	1	FD	150	300	85	170
rb450g	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	HD	300		195	
rb450g	2	RX	300		215	
rb450g	2	TX	300		225	
rb450g	4	FD	600	1200	335	670
rb750	4	FD	600	1200	335	670
rb450g	4	HD	600		<415> нема скріншота	
rb750	4	HD	600		370	

У режимі дуплекса швидкість падає, але все одно залишається понад 75 Мбіт/с у двох напрямках одночасно, практичного ліміту стандартного Wi-Fi в напівдуплексі.

Проведені випробування показали можливість побудови модемів (рисунок 4) для високошвидкісних систем релейного зв'язку на базі стандартів 802.11n і масштабованість до канальних швидкостей 1,2 Гбіт/с у дуплексі і вище шляхом об'єднання окремих каналів.

ВИСНОВКИ

Використання дуплексного протоколу Mikrotik dual nstreme дозволило подолати обмеження стандартів Wi-Fi й отримати практичну швидкість напівдуплексної і навіть дуплексної передачі вище половини канальної в усіх режимах. При цьому, ширина займаної смуги навіть з урахування захисних інтервалів є прийнятною для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону.

Розроблене для цілей тестування програмне забезпечення дозволило прискорити тестування, провести оптимізацію параметрів модема і досягти максимальних практичних швидкостей в усіх режимах. Практичні випробування підтвердили можливість використання маршрутизаторів B450g для агрегації невеликого числа каналів (до 4-х) і показали недостатню ефективність використання маршрутизатора Mikrotik RB750 навіть для цілей випробувань.

Аналіз показав, що для ефективної роботи протоколу dual nstreme потрібна висока продуктивність процесора, тому для підвищення швидкісних показників має сенс переглянути встановлену конфігурацію устаткування.

Використання більш дешевих агрегувальних маршрутизаторів дозволило б здешевити

конструкцію, не знижуючи продуктивність для конфігурацій з незначною кількістю радіоканалів, що агрегуються.

Щодо режиму агрегації bonding помітне зростання накладних витрат зі збільшенням кількості каналів, що обмежує використання даного режиму в конфігураціях з великим числом каналів. Більш ефективним було б використання для балансування трафіка протоколів маршрутизації, що збільшило б стійкість зв'язку у ситуаціях погіршення зв'язку в окремих каналах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ільченко М.Ю. Приемально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку з підвищеною спектральною ефективністю і пропускну здатністю / М.Ю. Ільченко, В.В. Волков, О.Г. Войтенко, В.Я. Казіміренко, Т.М. Наритник // Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» (ПТ-13) К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С.16.
2. Нарытник Т.Н. Исследования формирователя цифрового потока для телекоммуникационных систем терагерцового диапазона. Сборник научных трудов первой Международной научно-практической конференции «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии». – Харьков, 2013. – С. 23–26.
3. Нарытник Т.Н. Исследования формирователя информационного потока для канала связи с повышенной пропускной способностью / М.Я. Алиев, М.Е. Ильченко, А.Г. Войтенко, В.В. Волков, А.В. Дидковский, Т.Н. Нарытник // Матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.:НТУУ «КПІ», 2014. – С. 310-312.
4. (Ільченко М.Ю.) Пат. 84923, Україна, МПК H04B 7/165 (2006/0). Приемально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускну здатністю / М.Ю. Ільченко., О.Г. Войтенко, В.Я. Казіміренко, Т.М. Наритник, В.В. Свириденко, В.М. Радзіховський. Заявник і патентовласник Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u2013 03679, заявл. 26.03.2013; опубл.11.11.2013, бюл. № 21.– 4 с.
5. Пат. 51495А, Україна, МПК H04B 7/165. Мікрохвильова інтегрована телерадіоінформаційна система MITRIS-INT. Наритник Т.М., Казимиренко В.Я., Войтенко О.Г., Набок Є.М., Орлов А.Т., Савастьянов В.А., Файнгольд О.М. Заявник і патентовласник Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук національного прогресу». – № u2002 042956, заявл. 12.04.2002; опубл.15.11.2002, Бюл. № 11. – 4 с.

REFERENCES

1. Il'chenko M. Yu., Volkov V. V., Voytenko O. H., Kazimirenko V. Ya., Narytnyk T. M. «Pryymal'no-peredaval'nyy formuvach informatsiynoho potoku dlya kanalu zv'yazku z pidvyshchenoyu spektral'noyu efektyvnistyuu i propusknoyu zdatnistyuu» Materialy s'omoyi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Problemy telekomunikatsiy" (PT-13). Kyiv: NTUU "KPI", 2013. 16.
2. N., Narytnyk T. «Yssledovanye formyrovatelya tsyvrovoho potoka dlya telekommunikatsyonnykh system terahertsovoho dyapazona» Sbornyk nauchnykh trudov pervoy Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy "Problemy ynfokommunikatsyy. Nauka y tekhnolohyy". Khar'kov, 2013. 23–26.
3. Alyev M. Ya., Yl'chenko M. E., Voytenko A. H., Volkov V. V., Dydkovskyy A. V., Narytnyk T. N. «Yssledovanyya formatyrovanyya ynformatsyonnoho potoka dlya kanala svyazy s povyshennoy propusknoy sposobnost'yu» Materialy vos'moyi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Problemy telekomunikatsiy» Kyiv: NTUU "KPI", 2014. 310–312.
4. Il'chenko M. Yu., Voytenko O. H., Kazimirenko V. Ya., Narytnyk T. M., Svyrydenko V. V., Radzikhovskyy V. M. Pryymal'no-peredaval'nyy formuvach informatsiynoho potoku dlya kanalu zv'yazku iz pidvyshchenoyu spektral'noyu efektyvnistyuu ta propusknoyu zdatnistyuu. Ukrayina: Patent 84923. 11 11 2013 h.
5. Narytnyk T. M., Kazimirenko V. Ya., Voytenko O. H., Nabok Ye. M., Orlov A. T., Savast'yanov V. A., Faynhol'd O. M. Mikrokhvyl'ova intehrovana teleradioinformatsiyna systema MITRIS-INT. Ukrayina: Patent 51495A. 15 11 2002 h.