

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*Розглядаються питання побудови комп'ютерних локально-регіональних радіомереж, основу яких утворюють мікростільникові радіомережі передачі та прийому шумоподібних пакетів інформації. Описується структура радіомережі, аналізуються методи централізованого і децентралізованого управління роботою мікростільникових радіомереж, способи та характеристики множинного доступу абонентів до спільних ресурсів радіомережі, способи передачі та прийому шумоподібних пакетів інформації.*

© Б.М. Шевчук, А.І. Куляс,  
Ф.М. Горін та ін., 2002

УДК 681.31

Б. М. ШЕВЧУК, А. І. КУЛЯС, Ф.М. ГОРІН,  
В.П. КРАВЧЕНКО, В.З. ТИДНЮК, А.Ф. ПОТАПЕНКО

## ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МІКРОСТІЛЬНИКОВИХ РАДІОМЕРЕЖ ЗБОРУ, ОБРОБКИ І ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

У процесі побудови та функціонування комп'ютерних систем і мереж однією з базових операцій є організація передачі даних між пристроями або абонентами систем і мереж. Визначальною організація передачі інформації проявляється в розподілених на певній території системах (мережах), які, практично, перетворюються на комп'ютерні мережі передачі інформації. Перспективним напрямком розвитку таких мереж є мікростільникові комп'ютерні радіомережі, поява яких зумовлена тенденціями розвитку стільникових мереж зв'язку з урахуванням підвищення вірогідності та надійності передачі інформації при великій густині розміщення абонентів.

Порівняно з макростільниками, типовий радіус зв'язку яких досягає одиниці-десятки кілометрів (як правило, 3 - 20 км), в мікростільниках радіус зв'язку обмежується сотнями метрів-одинацями кілометрів (як правило, 0.2 - 2 км), а потужність абонентських радіопередавачів не перевищує десятки-сотні мВт (як правило, 10 - 100 мВт). Малі відстані забезпечують ефективно втілення базової концепції стільникового радіозв'язку, суть якої полягає у повторному використанні каналоутворюючих ресурсів на відстанях, що гарантують відсутність взаємних завад між ідентичними стільниками. Суттєвою перевагою технології мікростільникового радіо-

зв'язку, порівняно з іншими технологіями мобільного зв'язку, є поєднання й одночасне використання методів та засобів передачі і прийому шумоподібних пакетів інформації та малопотужних широкосмугових способів радіопередачі інформації. За рахунок цього досягаються мінімальні витрати енергії споживання та випромінювання радіопередавачів (остання характеристика є основою для забезпечення "екологічно чистого" радіозв'язку), а також надійна передача інформації в межах локальної зони зв'язку (сотні метрів - одиниці кілометрів). Слід зазначити, що для систем зв'язку справедлива така зако-номірність: покращання одного з показників системи призводить до неминучого погіршення іншого показника, при цьому ускладнюються алгоритми функціонування та структури окремих пристроїв і підсистем. Тому "платнею" за досягнення вищеперелічених переваг мікростільникового радіозв'язку є значне пониження швидкості передачі інформації, збільшення якої досягається за рахунок розширення робочого спектра радіочастот або організації паралельної передачі даних у спільному спектрі частот на основі кодового розподілення каналів (шляхом використання незалежних моноканалів передачі інформації).

Для передачі даних на великі відстані всю територію зони зв'язку можливо охопити відповідною кількістю стільників, використовуючи обмежену кількість каналоутворюючих ресурсів (смуг радіочастот або ортогональних сигналів). Вибір оптимальної кількості таких ресурсів, взаємне розміщення однотипних і різнотипних стільників описані в [1,2]. Альтернативним шляхом організації надійного зв'язку в межах території великого міста, промислових та сільськогосподарських регіонів з урахуванням економії абонентських каналоутворюючих засобів і ресурсів є використання всіма абонентами мікро-стільників спільного спектра радіочастот локального тракту зв'язку та реалізації концепції ШПС-систем (ШПС – шумоподібні сигнали) у процесі проектування абонентських засобів зв'язку. При цьому групі абонентів, які належать до відповідного мікростільника, виділяється один із ШПС, кількість яких відповідає кількості  $M$  однотипних мікростільників, центральні станції яких охоплюються трактом регіонального зв'язку. За допомогою 6-7 мікростільників можливо охопити територію мікрорайону або великого підприємства.

Для ефективної організації зв'язку між групами віддалених мікростільників окремі центральні станції мікростільників, стаціонарні абонентські системи, розміщені на пріоритетних висотах, рухомі автомобільні абоненти комплектуються засобами радіотракту  $f_1$  регіонального зв'язку. Доступ абонентів регіонального рівня до абонентів мікростільникових радіомереж здійснюється шляхом використання засобів радіотракту  $f_2$  локального зв'язку. Абонентами мікростільників є портативні термінали, які в межах території локального рівня зв'язку здійснюють передачу шумоподібних пакетів інформації в режимі роботи повнозв'язкової радіомережі, коли забезпечується зв'язок "кожного абонента з кожним", або в режимі роботи термінальної радіомережі, коли центральна станція мікростільника циклічно чи за заданою програмою обмінюється інформацією з портативними терміналами. Передача даних на великі відстані здійснюється

ся через центральну станцію стільника або абонентів-ретрансляторів, які мають вихід на абонентів регіонального рівня зв'язку. Доступ до абонентів інших комп'ютерних мереж і систем зв'язку забезпечується через абонентів-шлюзи, які також охоплюються рівнем регіонального зв'язку.

На основі засобів локально-регіональної радіомережі доцільно організувати передачу різноманітної інформації (короткі мовні та текстові повідомлення, комп'ютерні файли даних, відліки сигналів і т.д.) у межах території підприємств, установ, де абонентами мікростільників є фізичні особи (працівники підприємств), а також пристрої, системи, робототехнічні комплекси, транспортні засоби, станки, технологічні лінії і т.ін. При цьому в межах території локального рівня зв'язку за рахунок організації передачі шумоподібних пакетів інформації без використання централізованих мереж зв'язку забезпечуються умови для безоплатної передачі даних (порівняно з послугами мобільного стільникового зв'язку). Передача даних на великі відстані здійснюється шляхом організації доступу абонентів мікростільників до наявних на підприємствах засобів ретрансляції інформації, включаючи абонентів радіомережі регіонального рівня зв'язку, телефонної мережі, комп'ютерних мереж (Internet та ін.), мереж стільникового мобільного зв'язку (GSM та ін.), наземно-космічних засобів зв'язку. Досить ефективно така локально-регіональна радіомережа забезпечує контроль (моніторинг) станів об'єктів дослідження та керування різноманітної природи, включаючи промислові об'єкти, об'єкти охорони і навколишнього середовища, біооб'єкти та ін. При цьому центральні станції мікростільників в режимі централізованого або децентралізованого опиту станів об'єктових терміналів визначають інформаційні стани об'єктів контролю та керування і ретранслюють оперативну інформацію на велику відстань. Швидкість передачі інформації в радіомережі регіонального рівня вибирається значно більшою швидкості передачі інформації мікростільникових радіомереж.

Передачу інформації доцільно організувати в широкосмугових діапазонах надвисоких радіочастот, а саме в діапазонах 400 МГц, 800 - 900 МГц, 2,4 ГГц, 5,7 ГГц, проте не виключається організація передачі у вузькосмугових діапазонах ультракоротких хвиль (30–300 МГц). Характеристики системи передачі інформації, такі як швидкість передачі  $R$ , ширина робочого спектра радіочастот  $F$ , завадостійкість, допустима кількість одночасно працюючих абонентів або мноканалів  $M$ , залежать від величини  $V$  бази ШПС і можуть бути визначені із співвідношень [3]

$$h^2 = V \cdot h_0^2, \quad h^2 = V/M, \quad (1)$$

де  $h^2$  - відношення сигнал-шум на виході приймача ШПС;  $V = F \cdot T = F/R$  - база ШПС, який використовується для передачі бітового сигналу;  $F$  - ширина робочого спектра радіочастот;  $T$  - тривалість ШПС;  $R$  - швидкість передачі інформації;  $h_0^2$  - відношення сигнал-шум на вході приймача ШПС.

Таким чином, для забезпечення надійного прийому шумоподібних пакетів інформації за умов, коли співвідношення сигнал-шум на вході приймача  $h_0 \ll 1$ , згідно з (1), необхідно вибирати  $V \gg 1$ . Фактично величина  $V$  характеризує на-

надійність зв'язку, яка задається якістю відновлення інформації в точці прийому за умови, що сигнал-шум на виході приймача ШПС  $h^2 > h_{0\text{ пор}}^2 \gg 1$ . За заданої величини робочого спектру частот  $F$ , яка може знаходитися в межах від одиниць КГц до десятків МГц (залежно від діапазону радіочастот і орієнтації мережі зв'язку), вибрана величина  $B$  ШПС визначає допустимий рівень "зашумленості" працездатного каналу зв'язку або мінімально допустиму величину  $h_{0\text{ min}}^2$ , а також швидкість передачі інформації  $R$ . У загальному випадку величину  $B$  вибирають у межах десятки-сотні величин, при цьому доцільно адаптивно підбирати базу ШПС у межах  $B_{\text{min}} < B < B_{\text{max}}$  залежно від поточного рівня "зашумленості" радіоканалу [4]. У більш простіших випадках база ШПС є незмінною фіксованою величиною ( $B = 7 \dots 15$ ), тому в широкосмугових системах зв'язку швидкість передачі інформації може досягати одиниці-десятки Мбіт/с.

Ефективність функціонування радіомереж передачі інформації в основному залежить від умов радіозв'язку (наявності чи відсутності прямого бачення антенних систем абонентів, залежно від показників завадостійкості та надійності зв'язку та інших характеристик), а також від методів управління роботою радіомережі. При великій кількості рівнопріоритетних активних абонентів  $N_a \rightarrow N_{\text{max}}$ , де  $N_{\text{max}}$  – максимальна кількість абонентів радіомережі, доцільно використовувати централізоване управління роботою радіомережі, за якого організація передачі інформації здійснюється за рахунок ініціативи центральної станції ("ініціативи зверху"). В інших випадках перевагу слід віддати децентралізованим методам управління, основа яких – множинний доступ абонентів до спільних ресурсів радіомережі (радіоканалів чи абонентів). Суттєвою перевагою множинного доступу є оптимальне використання часових витрат у процесі експлуатації радіомережі за рахунок ініціативи абонентів ("ініціативи знизу"). Ефективність передачі інформації в радіомережах з множинним доступом абонентів до спільного ресурсу характеризується пропускною здатністю  $S$  протоколів передачі даних. Згідно з [5,6] пропускна здатність протоколів  $S = G \cdot P_{\text{оп}}$  визначає середню швидкість передачі інформації і вираховується кількістю передач у пакетах за тривалість часу передачі одного пакету, де  $G$  – трафік радіомережі,  $P_{\text{оп}}$  – ймовірність безконфліктної передачі інформаційних пакетів (ІП). За ідеальної організації передачі даних, за відсутності проміжків між пакетами та їх накладення один на одного,  $S = 1$ . За реальних умов, особливо коли можливі конфліктні ситуації за рахунок одночасної передачі ІП двома і більше абонентами,  $S < 1$ , відповідно,  $G > S$ .

Весь цикл передачі інформації розбивається на три характерні відрізки часу: інтервал множинного доступу  $t_{\text{мд}}$  конфлікуючих абонентів; інтервал передачі і прийому ІП  $t_{\text{ін}}$ ; інтервал передачі і прийому пакету-квитанції (ПК)  $t_{\text{пк}}$ . Для досягнення  $P_{\text{оп}} \rightarrow 1$  за основу базової процедури доступу в радіоканал у більшості протоколів множинного доступу [5,6,7] прийнята єдина для всіх конфлікуючих абонентів  $N_k$  послідовність дій після виявлення абонентами вільного стану радіоканалу, а саме: 1) організація контролю збереження вільного стану радіоканалу протягом інтервалу доступу і у випадку його зміни – відкладення спроби

передачі ІІ на випадковий інтервал часу; 2) формування випадкових інтервалів позбавлення конфліктів (тобто, фактично, абоненти повинні незалежно один від одного з урахуванням моменту звільнення радіоканалу і відповідно до рівня своєї пріоритетності розподілити в часі моменти прийняття рішення про вихід в радіоефір або про відкладення спроби передачі ІІ на більш пізній час); 3) здійснення додаткової затримки безпосередньо перед передачею ІІ на інтервал резервування, величина якого [8,9]  $t_p = t_{pp} + t_{дн} + t_{п}$ , де  $t_{pp}$  – тривалість часу розповсюдження радіохвиль між найбільш віддаленими абонентами радіомережі (стілника);  $t_{дн}$  – тривалість часу спрацювання детектора несучої (детектора зайнятості радіоканалу);  $t_{п}$  – тривалість часу переключення абонентського радіоприйомо-передавача із стану “Прийом” в стан “Передача”.

Кінцевим результатом множинного доступу є виявлення одного конфліктуючого абонента, який протягом мінімального інтервалу доступу в радіоканал  $t_{др} \ll T_{II}$  першим здійснить безконфліктну передачу ІІ, де  $T_{II}$  – тривалість ІІ. На практиці ймовірність безконфліктної передачі пакетів інформації протоколів множинного доступу  $P_{бп} < 1$  і ефективність протоколу залежить від наближення  $P_{бп} \rightarrow 1$ , що в свою чергу за заданої кількості конфліктуючих абонентів  $N_{к\max}$  призводить до збільшення інтервалу  $t_{др}$ . З урахуванням того, що передача ПК здійснюється безконфліктно (ПК може передаватись як по інформаційному каналу так і по окремому службовому каналу), а сумарний час зайнятості радіоканалу в процесі реалізації процедури доступу абонентів до радіоканалу і передачі ІІ одним із абонентів має тривалість  $T_3 = t_{др} + T_{II}$ , максимальну пропускну здатність протоколу  $S_{\max}$  можна визначити таким виразом [5,6,9]:

$$S_{\max} = T_{II} / T_3 = T_{II} / (t_{вк\min} + t_p + T_{II}), \quad (2)$$

де  $T_{II} = L \cdot t_0$  – тривалість ІІ;  $L$  – кількість біт ІІ;  $t_0$  – тривалість бітового сигналу;  $t_{вк\min}$  – мінімальна тривалість інтервалу вирішення конфліктів;  $t_p$  – тривалість інтервалу резервування.

Таким чином, ефективне вирішення проблеми множинного доступу абонентів до спільних ресурсів радіомережі полягає в оптимізації залежності  $t_{вк\min} = f(P_{бп} \rightarrow 1, N_{к} \rightarrow N_{к\max})$  за рахунок функціональної характеристики протоколу множинного доступу, тобто дій абонентів у процесі суперечки за доступ у радіоканал. Основу алгоритму поведінки конфліктуючих абонентів у процесі змагання за право безконфліктної передачі ІІ по радіоканалу є формування випадкових інтервалів шляхом генерації випадкових  $K$ -х чисел і відрахування відповідної кількості тактових інтервалів. За заданих величин  $P_{бп}$  і  $N_{к\max}$  досягнення мінімальної величини  $t_{вк\min}$  забезпечується при виборі мінімального діапазону формування випадкових чисел  $\gamma_{\min}$ , де  $\gamma = (K_{\max} - K_{\min}) + 1$  [7]. Тоді ймовірність появи  $K_j$  – го числа ( $j = 1, \gamma$ ) із групи рівноправних чисел  $\{K_{\min}, K_{\max}\}$   $p = 1/\gamma$ . Для того, щоб у процесі множинного доступу в радіоканал за рахунок здійснення одноразової процедури формування випадкового інтервалу в радіоканал вийшов один єдиний абонент, який би сформував найменше число,

необхідно, щоб із групи конфліктуючих абонентів  $N_k$  один абонент сформував якесь найменше число, а  $(N_k - 1)$  абонентів сформували б інші (більші) числа. Описана подія вимагає появи  $N_k$  результатів, у тому числі однієї появи якогось найменшого числа і  $(N_k - 1)$  появ інших чисел. Тоді ймовірність появи такої події з урахуванням всіх можливих рівноймовірних подій визначається виразом [7]

$$P_\alpha(\beta) = C_\alpha^\beta \cdot p^\beta \cdot (1 - p)^{\alpha - \beta} = \alpha! / (\beta!(\alpha - \beta)!) \cdot (1/\gamma)^\beta \cdot (1 - 1/\gamma)^{\alpha - \beta}, \quad (3)$$

де  $P_\alpha(\beta)$  – ймовірність виявлення  $\beta$  абонентів, які сформували найменші інтервали з початкової кількості конфліктуючих абонентів  $\alpha = N_{k \max}$ ;  $p^\beta$  – ймовірність очікуваної події, тобто ймовірність того, що  $\beta$  абонентів у процесі формування випадкових інтервалів сгенерували найменше число  $m$ ;  $(1 - p)^{\alpha - \beta}$  – ймовірність неочікуваної події, тобто ймовірність того, що інші  $(\alpha - \beta)$  абонентів згенерують числа, більші за число  $m$ ;  $C_\alpha^\beta$  – коефіцієнт, який враховує число можливих комбінацій із  $\alpha$  абонентів по  $\beta$  абонентів.

Після відповідних перетворень формулу (3) можна переписати у вигляді

$$P_\alpha(\beta) = C_\alpha^\beta \cdot (1/(\gamma - 1))^\beta \cdot (1 - 1/\gamma)^\alpha. \quad (4)$$

Розглянемо функцію (4) як функцію параметра  $\gamma$  і знайдемо значення  $\gamma_e$ , яке дає екстремум функції (4). Взввши похідну по  $\gamma$  від функції (4) і прирівнявши її до нуля, отримуємо рівняння

$$\alpha/\gamma^2 - \beta/\gamma = 0, \quad \text{або} \quad \alpha \cdot \gamma - \beta \cdot \gamma^2 = 0. \quad (5)$$

Із рівняння (5) знаходимо значення  $\gamma_e$ , за якого функція ймовірності (4) приймає екстремальне значення:  $\gamma_e = \alpha/\beta$ . Щоб визначити, яке значення (максимальне чи мінімальне) приймає ймовірність (4) при  $\gamma_e$ , візьмемо другу похідну від функції (4):

$$\partial^2 P_\alpha(\beta) / \partial \gamma^2 = c \cdot (\alpha - 2 \cdot \beta \cdot \gamma), \quad (6)$$

де  $c$  – деякий додатний множник. Підставляючи в (6) значення  $\gamma_e = \alpha/\beta$  отримуємо

$$\partial^2 P_\alpha(\beta) / \partial \gamma^2 = c \cdot (\alpha - 2 \cdot \beta \cdot \alpha/\beta) = c \cdot (\alpha - 2 \cdot \alpha) < 0. \quad (7)$$

Із виразу (7) робимо висновок, що значення  $\gamma = \alpha/\beta$  дає максимальну ймовірність (4). На основі отриманих даних за заданих величин  $N_k = N_{k \max}$  можливо визначити величину інтервалу  $t_{\text{вк min}}$ , що в свою чергу, згідно з виразом (2), дозволяє визначити максимальну пропускну здатність протоколу  $S_{\text{max}}$ . Величину  $N_{k \max}$  можливо обмежити, враховуючи ефект природного розподілу конфліктуючих абонентів на ділянках, які обмежуються концентричними колами відпові-

дних радіусів, центр яких відповідає місцезнаходженню абонента-адресата, який останнім передав ПК [9].

Ефективність управління роботою радіомереж значною мірою залежить від надійності зв'язку. За наявності умов прямої видимості антен абонентів надійність зв'язку, згідно з (1), залежить від вибору бази ШПС пакетів інформації та від способів побудови приймача ШПС. У процесі прийому шумоподібних пакетів інформації доцільно використовувати цифровий обчислювач взаємодульної функції [4,10], яка описується виразом

$$\bar{G}(jk) = \sum_{i=1}^N Y_{ij} = \sum_{i=1}^N \left| \bar{S}_i - X_{ik+j} \right| \quad (8)$$

де  $\bar{G}(jk)$  – поточний відлік інверсної модульної функції при  $j$ -му зсуві і  $k$ -й вибірці вихідного сигналу  $x(t)$  радіоприймача;  $j = 0, 1, 2, \dots, N-1, \dots, 2(N-1), \dots$  – величина часового зсуву ( $N = B$ );  $k = 1, d$  – кількість вибірок сигналу  $x(t)$  на інтервалі  $t_{\text{ел}} = T/B$  тривалості одного елемента ШПС;  $\bar{S}_i$  –  $i$ -й інверсний елемент опорного ШПС;  $X_{ik+j}$  –  $j$ -й зсув  $i$ -го відліку сигналу  $x(t)$  при  $k$ -й вибірці.

Аналіз роботи приймача ШПС показує, що внаслідок дії різних завад на інтервалі  $T$  тривалості ШПС величина основного піку функції  $\bar{G}(jk)$  зменшується на величину  $Z$ , яка відповідає кількості невірно відтворених елементів ШПС у процесі прийому інформації. Прийом шумоподібних пакетів з заданою ймовірністю  $P_{\text{п}}$  залежить від величин  $B$  та  $h^2_0$ , і на виході кореляційного обчислювача якість прийому інформації характеризується співвідношенням величини основного піку  $G(0)$  і величин порогів  $\Pi_0$  і  $\Pi_1$ , які використовуються в процесі прийняття рішення про прийом відповідних інформаційних символів. Вибір величин порогів  $\Pi_0$  і  $\Pi_1$  обґрунтований в [4].

Запропоновані методи побудови та функціонування комп'ютерних радіомереж дозволяють оперативно організувати передачу інформації в різноманітних областях людської діяльності, використовуючи прості та ефективні термінали і абонентські системи мікростільникових радіомереж.

1. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1999. – 256 с.
2. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Мобильные Теле-Системы, – Эко – Трендз, 1997. – 240 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Шевчук Б.М. Шляхи підвищення ефективності функціонування комп'ютерних радіомереж збору, оброблення та передачі інформації // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: Третя всеукр. міжнар. конф. – Київ: Укр. асоц. з обробл. інформ. та розпізн. образів, 1996. – С. 262 – 264.
5. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
6. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радио-связью. – Киев: Техніка, 1989. – 223 с.

7. *Шевчук Б.М., Кравченко В.П.* Функціональні характеристики та параметри протоколів багатостанційного доступу в радіоканал з багатоцикловим формуванням випадково-зменшуючих елементарних інтервалів // Матеріали 2-ї Все-укр. конф. викладачів фізики пед. ін-тів та ун-тів. – Київ: Укр. держ. пед. ун-т, 1996. – С. 229 – 234.
8. *Шевчук Б.М.* Методы и средства построения микросотовых радиосетей сбора, обработки и передачи биомедицинской информации // Кибернетика и вычисл. техника. – 1998. – Вып. 120. – С. 76 – 84.
9. *Шевчук Б.М., Кравченко В.П.* Определение параметров протоколов функционирования микросотовых радиосетей сбора, обработки и передачи биомедицинской информации // Кибернетика и вычисл. техника. – 2000. – Вып. 128. – С. 82 – 90.
10. *Николайчук Я.Н., Шевчук Б.М.* Реализация физического уровня низовых вычислительных сетей на основе цифровых приемо-передатчиков // 5 Всесоюз. конф. КОМПАК-87 “Вычислительные сети коммутации пакетов”: Тез. докл., 27-29 окт. 1987 г. – Рига, 1987. – Т.2. – С. 54 - 58.

Получено 01. 07. 2002