

О.В. Тимченко, Фрейхат Ахмад, Аль-бдур Нашат
Національний університет “Львівська політехніка”

КОНВЕРТОРИ ДОВЖИНИ ХВИЛІ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ЧОТИРИХВИЛЕВОГО ЗМІШУВАННЯ ДЛЯ WDM СИСТЕМ

© Тимченко О.В., Фрейхат Ахмад, Аль-бдур Нашат, 2009

Розглядаються можливості використання ефекту чотирехвильового змішування (FWM) для конверсії довжини хвилі оптичної несучої в системах передачі даних з мультиплексуванням по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Таке перетворення дає змогу зменшити імовірність конфліктів у вузлах комутації і збільшити тим самим загальну пропускну здатність оптичної мережі.

Possibilities of the use of effect of the fourwave mixing (FWM) are examined for conversion of wave-length optical bearing in the systems communication of data with Wavelength Division Multiplexing – WDM. Such transformation allows decrease probability of conflicts in the knots of commutation and increase the general carrying capacity of optical network the same.

Вступ

За останні роки вимоги до ширини смуги пропускання зростають дуже швидко через розвиток Інтернету і появу нових мультимедіа-додатків і послуг.

Мережі, що використовують оптичне волокно для передачі інформації, привабливі, тому що воно створює ширину смуги пропускання до 25 ТГц (1 ТГц = 10^{12} Гц), має малі втрати – 0,2 Дб/км і дуже малу кількість помилок, порядку 10^{-13} – 10^{-15} на біт [1, 2].

У повністю оптичних мережах інформація проходить оптичним середовищем вздовж усього шляху, за винятком крайніх пунктів. Такий шлях називається світловим (*lightpath*). Технологія прийому-передачі усієї смуги пропускання оптичного каналу називається мультиплексуванням по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing – WDM) [2].

Спочатку в світлопровідних системах використовувалась одна довжина хвилі від джерела до отримувача сигналу (повністю світловий шлях). Проте такий метод, як мінімум, недостатньо ефективний через можливі конфлікти передачі, що призводять до зменшення пропускну здатності мережі загалом. Для успішнішої передачі даних і збільшення пропускну здатності систем WDM була розроблена концепція перетворення довжини хвилі, що входить у вузол, в деякий діапазон сусідніх з нею довжин хвиль, що виходять з вузла. Це перетворення довжини хвилі у вузлі прийнято називати конверсією довжини хвилі. Конверсія довжин хвиль може відбуватися в усьому діапазоні вихідних довжин хвиль, тобто існує можливість повної конверсії у вузлі [3].

Завдяки цьому передача даних в системі WDM відбувається по напівсвітлових шляхах (по світлових шляхах лише на обмеженій ділянці мережі), з максимально можливим завантаженням усіх каналів передачі даних незалежно від довжини хвилі джерела. Для цього необхідно виконувати перетворення довжини хвилі у вузлах комутації, де можливе виникнення конфліктів.

Для виконання передачі по напівсвітлових шляхах застосовуються конвертори довжини хвилі, виконані на різних фізичних принципах. Одним з них є нелінійний ефект чотирехвильового змішування (FWM), що уможливорює перенести інформацію з однієї довжини хвилі на іншу, тобто виконати конверсію довжини хвилі.

Методика мультиплексування по довжині хвилі

Світло з різними довжинами хвиль від декількох лазерів (джерел) передається мультиплексору, а він ущільнює їх для передачі одним оптоволоконном. Технологія мультиплексування по довжині хвилі WDM розбиває оптичний спектр на декілька довжин хвиль.

Оптичні підсилювачі, що знаходяться переважно на відстані десятків кілометрів один від одного, підсилюють усі хвилі одночасно. Сигнали, що приходять на демультимплексор, розділяються і відправляються одержувачам (рис. 1).



Рис. 1. Організація потоку даних з використанням WDM

Повністю оптичні мережі представляють клас систем, у функціонуванні яких головну роль під час комутації, мультиплексування і ретрансляції відіграють не електронні (оптоелектронні), а суто оптичні технології [3, 4].

Основні пристрої і елементи, що використовуються у повністю оптичних мережах:

а) лазери і світлодіоди, які можуть використовуватися як джерела випромінювання, світлодіоди розраховані на великий діаметр волокна (багатомодові волокна), а лазери краще підходять для передачі сигналу одномодовим волокном;

б) пасивні оптичні мультиплектори, що збирають декілька простих сигналів різних довжин хвиль з декількох волокон в мультиплексний сигнал, що розповсюджується одним волокном;

в) пасивні оптичні демультимплектори, які виконують зворотну функцію і забезпечують виділення каналів в окремі волокна зі складного мультиплексного сигналу, представленого множиною каналів, і далі йде одним волокном;

г) оптичні комутатори, які виконують в повністю оптичних мережах ту саму функцію, що й звичайні електронні комутатори в традиційних мережах, тобто забезпечують комутацію каналів або комутацію пакетів;

д) фільтри, які призначені для виділення одного потрібного каналу з множини мультиплексованих каналів, що поширюються у волокні (функції фільтра може виконувати оптичний демультимплексор);

е) хвилеві конвертори, призначені для перетворення однієї довжини хвилі в іншу.

У мережах з мультиплексуванням по довжині хвилі оптичний спектр ділиться на множину різних довжин хвиль, кожна з яких передається з максимальною швидкістю [3].

У мережах з повною зміною довжин хвиль заявка приймається, якщо на усіх ланках її маршруту є хоча б одна вільна довжина хвилі для передачі. У мережах без зміни довжин хвиль заявка приймається на передачу, якщо запрошувана довжина хвилі вільна на усіх ланках маршруту. Це означає, що заявка може бути заблокована, якщо існують вільні довжини хвиль, але не існує запрошуваної для передачі на усіх ланках шляху. Тому повна конверсія довжин хвиль зменшує вірогідність блокування, хоча є доволі складним технічним завданням.

Ефект чотирьохвильового змішування

В результаті ефекту чотирьохвильового змішування (FWM) три довжини хвиль, що розповсюджуються в тому самому напрямку, f_i , f_j та f_k , генерують четверту з частотою:

$$f_{FWM} = f_i + f_j - f_k, \text{ де } i, j \neq k. \quad (1)$$

Для трьох вхідних сигналів f_i , f_j та f_k з рівномірною шкалою $\Delta f = f_j - f_i = f_k - f_j$ в результаті ефекту FWM виникає дев'ять нових хвиль відповідно до (1). Продукти ефекту FWM можуть з'явитися на заданих частотах.

Кількість продуктів FWM залежить від кількості вхідних сигналів N :

$$LPP = \frac{1}{2}(N^3 - N^2). \quad (2)$$

Цю величину подано у табл. 1.

Таблиця 1

Залежність кількості різних продуктів FWM від кількості вхідних сигналів

N	3	4	5	8	10	16	32
LPP	9	24	50	224	450	1920	15872

Як бачимо, ріст кількості використовуваних каналів приводить до дуже швидкого росту кількості продуктів FWM, які можуть з'явитись на використовуваних каналах, що, власне, є необхідним для реалізації конверторів довжини хвилі.

Положення і розподіл продуктів FWM

Розглянемо рівномірний розподіл трьох каналів, що характеризується рівним проміжком між двома сусідніми каналами, $\Delta f = f_2 - f_1 = f_3 - f_2 = 1$. В результаті ефекту FWM виникає десять продуктів. Для випадку чотирьох, рівномірно розташованих каналів, розподіл каналів наведено у табл. 2 (проілюстровано на рис. 2).

Таблиця 2

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох, рівномірно розміщених вхідних сигналів

Канал	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Частоти користувачі	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
Продукти FWM	1	3	6	3	5	5	3	6	3	1

Нерівномірний розподіл каналів

У разі нерівномірного розподілу каналів сусідні канали стоять на різній відстані між собою. Нехай маємо три вхідні сигнали з частотами f_1 , f_2 та f_4 , розміщеними в каналах 1, 2 та 4 з нерівномірними відстанями, завбільшки $\Delta f = f_2 - f_1 = 1$ та $2\Delta f = f_4 - f_2 = 2$. За FWM отримаємо десять продуктів, розміщення яких ілюструє рис. 3.

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох, нерівномірно розміщених вхідних сигналів, подані у табл. 3 та ілюструються рис. 4.



Рис. 2. Розподіл продуктів FWM для трьох, рівномірно розміщених вхідних сигналів

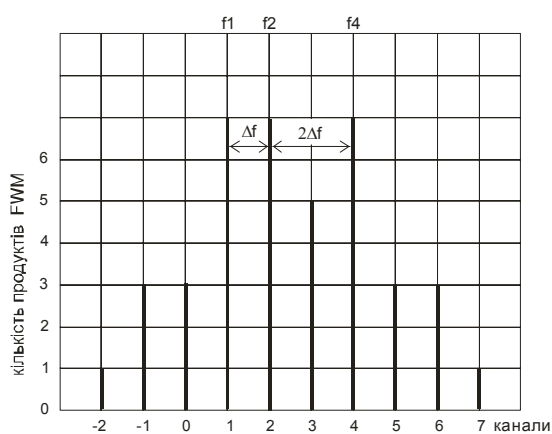


Рис. 3. Розподіл продуктів FWM для трьох, нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох, нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Канал	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Частоти користувача	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Продукти FWM	1	2	1	3	4	2	1	0	3	2	4	3	1	2	2	3	0	1	1



Рис. 4. Розподіл продуктів FWM для чотирьох, нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Як бачимо з наведених прикладів, у разі нерівномірно розміщених вхідних сигналів кількість продуктів FWM, що з'являються на каналах користувача, менша, ніж у разі рівномірного розподілу сигналів за тієї самої кількості каналів. Це є результатом не тільки розширення спектра за тієї самої кількості каналів N і відстані між каналами, а й способом розміщення каналів користувача. У разі певного розміщення каналів користувача кількість продуктів FWM зменшується, і здебільшого ці продукти не з'являються на каналах користувача.

Потужність продуктів ефекту FWM

Залежність потужності продуктів FWM P_{FWM} для частоти $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ має вигляд [5]:

$$P_{FWM} = \eta \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (D_i \chi)^2 \left(\frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i(0) P_j(0) P_k(0) e^{-\alpha L}, \quad (3)$$

де $P_i(0), P_j(0), P_k(0)$ – потужність хвиль з частотами f_i, f_j, f_k ; n – груповий коефіцієнт заломлення; λ – довжина хвилі; c – швидкість світла; α – постійна затухання; L – довжина світловода; D_i – коефіцієнт генерації: $D_i = 6$ для $i \neq j \neq k$, $D_i = 3$ для $i = j \neq k$; χ – нелінійність третього порядку; A_{eff} – поверхня моди; L_{eff} – ефективна довжина світловода; η – продуктивність чотирихвильового змішування.

Ефективну довжину світловода L_{eff} знаходять з виразу

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}. \quad (4)$$

Продуктивність чотирихвильового змішування можна обчислити за формулою [5]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + 4e^{-\alpha L} \frac{\sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right], \quad (5)$$

де $\Delta\beta$ – фазова неузгодженість.

Використовуючи [3], маємо:

$$\Delta\beta = -\beta(f_{FWM}) + \beta(f_i) + \beta(f_j) - \beta(f_k). \quad (6)$$

Розкладаючи постійну розповсюдження β в ряд в околі частоти f_0 , матимемо:

$$\beta(f) = \beta(f_0) + (f - f_0) \frac{d\beta}{df}(f_0) + \frac{1}{2}(f - f_0)^2 \frac{d^2\beta}{df^2}(f_0) + \frac{1}{6}(f - f_0)^3 \frac{d^3\beta}{df^3}(f_0). \quad (7)$$

Після перетворення вираз (7) можна записати у вигляді:

$$\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c}(f_i - f_k)(f_j - f_k) \left[D(f_0) - ((f_i - f_0) + (f_j - f_0)) \frac{\lambda^2}{2c} D'(f_0) \right]. \quad (8)$$

Для f_0 , для якого $D(f_0) = 0$, отримаємо:

$$\Delta\beta = -(f_i - f_k)(f_j - f_k) \left((f_i - f_0) + (f_j - f_0) \right) \frac{\lambda^4}{2c^2} D'(f_0). \quad (9)$$

Коли $D'(f_0) = 0$, остаточно отримаємо:

$$\Delta\beta = -(f_i - f_k)(f_j - f_k) \frac{\lambda^2}{2c} D(f_0). \quad (10)$$

Як впливає з останнього рівняння, величина $\Delta\beta$ залежить від відстані між каналами та величини дисперсії. Змінюючи ці параметри, можна легко регулювати величину $\Delta\beta$, а значить і продуктивність чотирихвильового змішування. Ця продуктивність максимальна для $\Delta\beta = 0$ і дорівнює $\eta = 1$. Проте це існує лише у випадку, коли відстань між каналами дорівнює нулю, або коли дисперсія і її приріст дорівнюють нулю.

Дослідження продуктивності FWM

Згідно з рекомендаціями ІТУ-Т в оптичних лініях застосовуються чотири типи світловодів (G.652-G.655). Проведемо дослідження продуктивності чотирихвильового змішування для таких типів світловодів:

1. SMF (англ. *Single-mode optical Fibre Cable*) ІТУ-Т G.652 [6].
2. DSF (англ. *Dispersion-Shifted Single mode*) ІТУ-Т G.653 [7].
3. NZDSF (англ. *Non Zero Dispersion-Shifted Single mode Optical fibre cable*) G.655 [8].

Для розрахунку залежності продуктивності чотирихвильового змішування від відстані між каналами для різних типів світловодів і різних довжин використані залежності (5) з такими значеннями параметрів:

- постійна затухання $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км} \cdot 0,23 = 0,046 \text{ км}^{-1}$;
- швидкість світла $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$;
- дисперсійний коефіцієнт:
SMF $D = 17 \text{ пс/нм} \times \text{км}$, $D' = 0 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$;
DSF $D = 0 \text{ пс/нм} \times \text{км}$, $D' = 0,08 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$;
NZDSF $D = 4 \text{ пс/нм} \times \text{км}$, $D' = 0 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$;
- крок $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$;
- довжина світловода $l = 20 \text{ км}$, $l = 100 \text{ км}$.

Під час розрахунків прийнято постійне значення дисперсії для усього світловода. Результати обчислень показано на рис. 5–8.

З представлених результатів можна визначити сильну залежність продуктивності FWM від міжканального інтервалу. Для міжканального інтервалу $\Delta f = 100 \text{ ГГц}$, а таким є запропонований ІТУ-Т в G.692 [6], маємо значне зменшення ефекту чотирихвильового змішування. Проте зменшення міжканального інтервалу призводить до значного впливу ефекту FWM. Крім того, збільшення ефекту FWM відбувається за збільшення величини дисперсії світловода. У звичайних системах передачі таке збільшення дисперсії обмежує пропускну здатність світловода, оскільки збільшується можливість спотворень сигналу. Найменш придатними для високопродуктивних перетворювачів довжини хвилі на основі чотирихвильового змішування є світловоди з ненульовою дисперсією NZDSF. Рис. 7 і 8 показують залежність продуктивності чотирихвильового змішування від дисперсії.

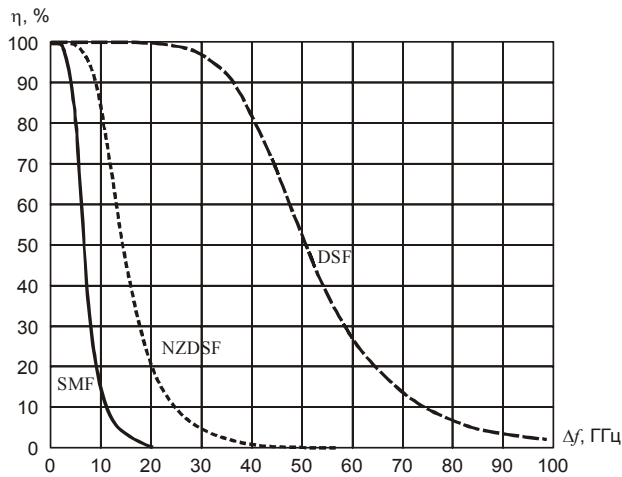


Рис. 5. Залежність продуктивності FWM η від міжканального інтервалу Δf для трьох типів світловодів SMF, DSF, NZDSF однакової довжини

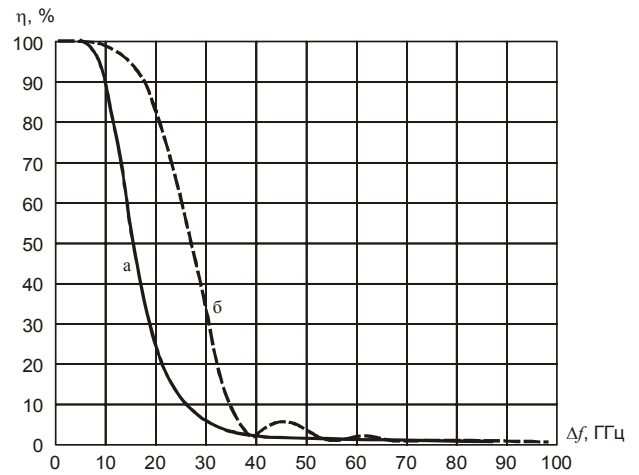


Рис. 6. Залежність продуктивності FWM η від міжканального інтервалу Δf для світловода NZDSF для двох різних довжин світловода: а – 100 км; б – 20 км

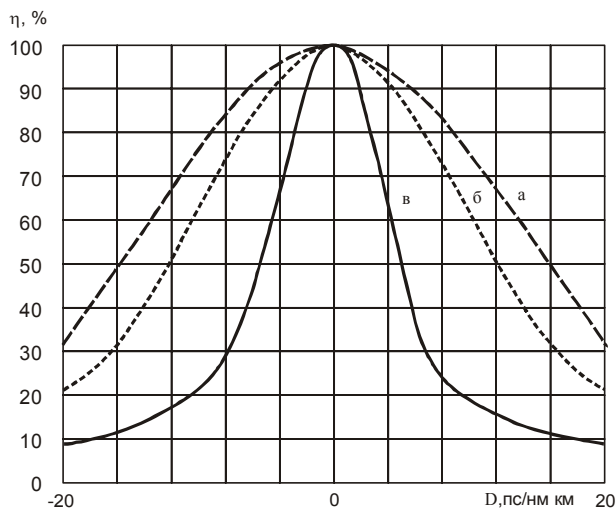


Рис. 7. Залежність продуктивності FWM η від дисперсії D для світловодів завдовжки: а – 40 км; б – 60 км; в 80 км; $\Delta f = 10$ ГГц

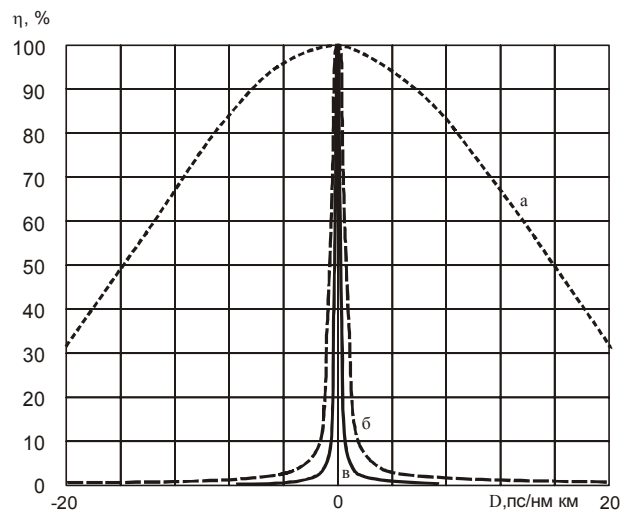


Рис. 8. Залежність продуктивності FWM η від дисперсії D для світловода завдовжки $l = 20$ км і міжканального інтервалу Δf : а – 10 ГГц; б – 50 ГГц; в – 100 ГГц

Висновки

У роботі описано застосування ефекту чотирьоххвильового змішування для конверсії довжини хвилі в системах DVDM. Показано, що продукти змішування можуть з'являтися в необхідних каналах, що дає змогу керувати маршрутизацією повідомлень у таких системах. Потужність результату змішування залежить від великої кількості факторів, таких як спосіб розміщення вхідних каналів, потужності випромінювання, виду світловодів. Чим більший коефіцієнт дисперсії світловода, більша потужність передачі в одному каналі або густіше розміщені канали передачі, тим більшу потужність продуктів чотирьоххвильового змішування можна отримати у цьому типі конверторів.

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Syrgis Systems, 1999. 2. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с. 3. Скляр О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: Солон-Р, 2001. 4. Тимченко О.В., Фрейхат Ахмад, Альбдур Нашат. Розв'язок задачі розташування конверторів довжини хвилі для підвищення ефек-

тивності повністю оптичних мереж // *Модельовання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України.* – К.: 2007. – Вип. 42. – С.170–176. 5. Nori Shibata, Ralf P. Braun, Robert G. Waarts, *Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through Four-Wave Mixing in a single-mode optical fiber, IEEE Journal of quantum electronics.* – V.QE–23, N 7. July 1987. – P.1205–1210. 6. ITU-T Recommendation G.652. *Characteristics of a single-mode optical fibre cable.* – Geneva, 1993. 7. ITU-T Recommendation G.653. *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable.* Geneva, 1996. 8. ITU-T Recommendation G.655. *Characteristics of a non zero dispersion-shifted singlemode optical fibre cable.* – Geneva, 1996.

УДК 621.391

Д.В. Агеев, Д.В. Евлаш

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
кафедра телекоммуникационных систем

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ САМОПОДОБНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ, ПЕРЕДАЮЩИХСЯ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ, ПРИ ПРЕДОСТАВЛЕНИИ УСЛУГ “TRIPLE PLAY”

© Агеев Д.В., Евлаш Д.В., 2009

Розроблено і описано метод розрахунку параметрів інформаційних потоків в каналах зв'язку. Подано практичні рекомендації з його застосування. Наведено результати розрахунків з використанням цього методу.

A method for calculating the parameters of information flow in the communication channels is developed and described. It is given practical advice on its application. The results of calculations using this method are given.

Введение

Современное общество нуждается в информационно-коммуникационных услугах телефонии, телевидения и доступа в сеть Интернет. До недавнего времени данные услуги предоставлялись по средствам различных, между собой независимых сетей, таких как телефонная сеть с коммутацией каналов, кабельная сеть аналогового телевидения, сеть передачи данных. Такой способ предоставления услуг является не рациональным и дорогостоящим, из-за необходимости строить и обслуживать сразу три сети. Более рационально предоставлять услуги по средствам одной мультисервисной сети, позволяющей передавать информацию любого типа (речь, видео, данные и т. п.). Предоставление услуг телефонии, телевидения и доступа в сеть Интернет по средствам одной сети обозначается термином «Triple Play», переход на которую осуществляется во всем мире.

Одним из этапов такого перехода является проектирование мультисервисной сети для предоставления услуг заданного качества. В то же время наблюдается отставание развития методов проектирования относительно развития технических средств, что является одной из актуальных проблем современных телекоммуникационных систем.

При проектировании телекоммуникационных систем решается задача расчета параметров информационных потоков, передающихся по каналам связи данной системы, при решении которой применяются классические модели информационных потоков. Данные модели не учитывают такие свойства информационных потоков, как: высокая пачечность и наличие долговременных зависимостей. Дальнейшие расчеты параметров структурных элементов системы на основании рассчитанных значений информационных потоков, передающихся по каналам сети, дают