

Туровський О.Л., Панадій С.В., Ліщиновська Н.О.

*Державний університет телекомунікацій, Київ*

## ОСОБЛИВОСТІ ТА ЗАВДАННЯ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

*Супутниковий зв'язок інтенсивно використовується при реалізації важливих національних проєктів, в тому числі для ефективного вирішення завдань національної безпеки, з метою соціально-економічного розвитку держави і успішного міжнародного співробітництва.*

*Застосування космічних технологій не тільки істотно підвищило продуктивність систем зв'язку, а й дозволило безпосередньо забезпечити зв'язок з найбільш віддаленими частинами земної кулі. Будівництво нових систем передачі даних тісно пов'язується з прогнозами розвитку послуг зв'язку, а також з більш раціональним розподілом обсягів і видів послуг між супутниковими, радіорелейними, волоконно-оптичними системами. Подібне прогнозування, засноване на дослідженні тенденцій розвитку засобів і систем зв'язку і послуг, що надаються, особливо важливо в сучасних економічних умовах.*

*В статті проведено аналіз сучасних супутникових систем передачі дискретних даних та визначено, що для розглянутих супутникових систем зв'язку характерна вкрай низька енергетика каналу, значна частотна невизначеність сигналу та наявність «сусідніх каналів». Для підвищення ефективності їх використання необхідна когерентна обробка сигналу в демодуляторі та використання потужного завадостійкого кодування. А для систем супутникового зв'язку з багатостанційним доступом з частотним поділом каналів необхідний множинний доступ і надання каналу на вимогу та робота, як в безперервному, так і в пакетному режимах.*

*При реалізації процедур синхронізації в супутниковому каналі визначне значення має синхронізація несучої частоти. При цьому для вирішення завдання розробки алгоритму оцінки несучої частоти ФМ сигналу в когерентних демодуляторах сучасних систем зв'язку в статті запропоновано: визначити потенційні кордони дисперсії одержаних оцінок, розробити алгоритм оцінки несучої частоти ФМ сигналу, що враховує специфіку супутникового каналу зв'язку та розробити реалізаційні процедури оцінювання на базі швидкого перетворення Фур'є.*

**Ключові слова:** системи супутникового зв'язку, енергетика супутникового каналу зв'язку, частотна невизначеність сигналу, когерентна обробка сигналу, завадостійке кодування.

Turovsky O.L., Panadii S.V., Lishchynovska N.O.

*State University of Telecommunications, Kyiv*

## PECULIARITIES AND TASKS OF ESTIMATING THE CARRIAGE FREQUENCY OF MODERN SATELLITE DATA TRANSMISSION SYSTEMS

*Satellite communication is intensively used in the implementation of important national projects, including for the effective solution of national security tasks, with the aim of socio-economic development of states and successful international cooperation.*

*The use of space technology not only significantly improved the performance of communication systems, but also allowed to connect with each other directly the most remote parts of the globe. The construction of new data transmission systems is closely linked to the forecasts for the development of telecommunication services, as well as to a more rational distribution of volumes and types of services between satellite, radio relay and fiber-optic systems. Such forecasting, based on the study of trends in the development of communications and communication systems and services provided, is particularly important in today's economic environment.*

*The article analyzes modern satellite systems for discrete data transmission and determined that the considered satellite systems are characterized by extremely low channel energy, significant signal frequency uncertainty and the presence of "adjacent channels". To improve their efficiency, coherent signal processing in the demodulator and the use of powerful noise immunity encoding are required. And for multi-channel satellite access systems with frequency division, providing on-demand channel requires multiple access and*

*provisioning for on-demand channel and operation in both continuous and batch modes. When implementing satellite synchronization procedures, the carrier frequency synchronization determines the decisive value. In order to solve the problem of developing an algorithm for estimating the carrier frequency of the FM signal in coherent demodulators of modern communication systems, the article proposes to determine the potential boundaries of the dispersions of the obtained estimates, to develop an algorithm for estimating the carrier and frequencies of the FM signal, taking into account the specifics of the satellite communication channel and development fast Fourier transform estimation procedures.*

**Key words:** *satellite communication systems, satellite communications channel energy, signal frequency uncertainty, coherent signal processing, noise-resistant coding.*

**Туровский А.Л., Панадий С.В., Лициновская Н.О.**

*Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

## **ОСОБЕННОСТИ И ЗАДАЧИ ПО ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

*Спутниковая связь интенсивно используется при реализации важных национальных проектов, в том числе для эффективного решения задач национальной безопасности, с целью социально-экономического развития государства и успешного международного сотрудничества.*

*Применение космических технологий не только существенно повысило производительность систем связи, но и позволило связать друг с другом непосредственно наиболее отдаленные части земного шара. Строительство новых систем передачи данных тесно связывается с прогнозами развития услуг связи, а также с более рациональным распределением объемов и видов услуг между спутниковыми, радиорелейными, волоконно-оптическими системами. Подобное прогнозирование, основанное на исследовании тенденций развития средств и систем связи и услуг, особенно важно в современных экономических условиях.*

*В статье проведен анализ современных спутниковых систем передачи дискретных данных и определено, что для рассматриваемых спутниковых систем связи характерна крайне низкая энергетика канала, значительная частотная неопределенность сигнала и наличие «соседних каналов». Для повышения эффективности их использования необходима когерентная обработка сигнала в демодуляторе и использования мощного помехоустойчивого кодирования. А для систем спутниковой связи с много станционным доступом с частотным разделением каналов – предоставлением канала по требованию необходим множественный доступ и предоставление канала по требованию и работа, как в непрерывном, так и в пакетном режимах.*

*При реализации процедур синхронизации в спутниковом канале определяющее значение имеет синхронизация несущей частоты. При этом для, решения задачи разработки алгоритма оценки несущей частоты ФМ сигнала в когерентных демодуляторах современных систем связи в статье предложено определить потенциальные границы дисперсий полученных оценок, разработать алгоритм оценки несущей и частот ФМ сигнала, учитывающий специфику спутникового канала связи и разработать реализационные процедуры оценки на базе быстрого преобразования Фурье.*

**Ключевые слова:** *системы спутниковой связи, энергетика спутникового канала связи, частотная неопределенность сигнала, когерентная обработка сигнала, помехоустойчивое кодирование.*

### **1. Вступ**

У всьому світі існують території та регіони з низькою щільністю населення і складним географічним ландшафтом. З економічної позиції ефективніше надавати цим територіям послуги сучасного супутникового зв'язку, що відрізняється рядом переваг в порівнянні з кабельними системами.

Супутниковий зв'язок інтенсивно використовується при реалізації важливих національних проектів, в тому числі для ефективного вирішення завдань національної безпеки, з метою соціально-економічного розвитку держав і успішного міжнародного співробітництва.

На сьогоднішній день розвиток супутникової сфери зв'язку складно уявити без її зв'язку з наземними мережами. Більшість змін в інфраструктурі значно впливають як на послуги супутникового зв'язку, так і на характеристики систем.

Сьогоднішній ринок супутникового зв'язку дуже динамічний, схильний до значних коливань цін, криз надвиробництва, різких змін в перспективі попиту на ті, чи інші послуги. Дані обставини вимагають адаптації космічних перспективних апаратів до різних зон обслуговування, а також швидкості реагування.

Слід також зазначити, що застосування космічних технологій не тільки істотно підвищило продуктивність систем зв'язку, а й дозволило безпосередньо зв'язати один з одним найбільш віддалені частини земної кулі. Будівництво нових систем передачі даних тісно пов'язується з прогнозами розвитку послуг зв'язку, а також з більш раціональним розподілом обсягів і видів послуг між супутниковими, радіорелейними, волоконно-оптичними системами. Подібне прогнозування, засноване на дослідженні тенденцій розвитку засобів і систем зв'язку та послуг, що надаються, має особливе значення в сучасних економічних умовах.

Тому, для підтримки динаміки розвитку супутникової галузі потрібен комплексний підхід, і більш конкретно – використання не тільки геостационарних супутників, але також і супутників на низьких орбітах. При цьому потрібно враховувати особливості побудови космічного сегмента та недоліки і переваги всіх типів супутникових систем.

У наш час існує два види супутників: низькоорбітальні і геостационарні.

Геостационарними супутниками називають супутники, що знаходяться на геостационарній орбіті. Геостационарною орбітою називають орбіту, розташовану над екватором Землі ( $0^\circ$  широти). Перебуваючи на ній штучний супутник обертається по колу зі швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості обертання Землі навколо своєї осі [1].

На сьогоднішній день геостационарні супутники виконують велику кількість різноманітних завдань, включаючи телекомунікаційні, визначення місця розташування об'єктів, радіозв'язок в ультракороткохвильових діапазонах. Впровадження супутникових систем відіграє виняткову роль в соціальному і економічному розвитку як всієї держави в цілому і дозволяє підняти на якісно новий рівень співпрацю між різними країнами.

Поруч з очевидними перевагами, геостационарні системи зв'язку мають і ряд недоліків.

Для значної частини території земної кулі ситуація ускладнюється малими кутами місця антен земних станцій супутникового зв'язку. Це призводить до затінення супутника місцевими предметами та збільшення шумів, що утворюються радіо шумовим випромінюванням земної кулі [2].

Проблеми передачі сигналів в сучасних супутникових системах визначаються певними особливостями як побудови самої системи, так проблемами обробки прийому та передачі сигналу.

Для визначення проблем безпосередньо обробки сигналу розглянемо математичну модель модульованого сигналу, що приймається сучасною супутниковою системою [3]:

$$S_{IF}(t) = \text{Re}\{S_{CE}(t)\exp(j2\pi f_c t)\},$$

де  $S_{IF}(t)$  – переданий модульований сигнал;

$f_c$  – несуча частота сигналу;

$S_{CE}(t)$  – функція комплексної огибаючої сигналу  $S_{IF}(t)$  по відношенню до частоти несучого коливання.

Для виділення переданої інформації на практиці сигнал, що приймається, перетворюється в низькочастотну область.

На рис. 1 це перетворення зводиться до помноження сигналу  $S_{IF}(t)$  на два опорних коливання  $\cos(2\pi f_c + \varphi_c)$  та  $-\sin(2\pi f_c + \varphi_c)$  [4].

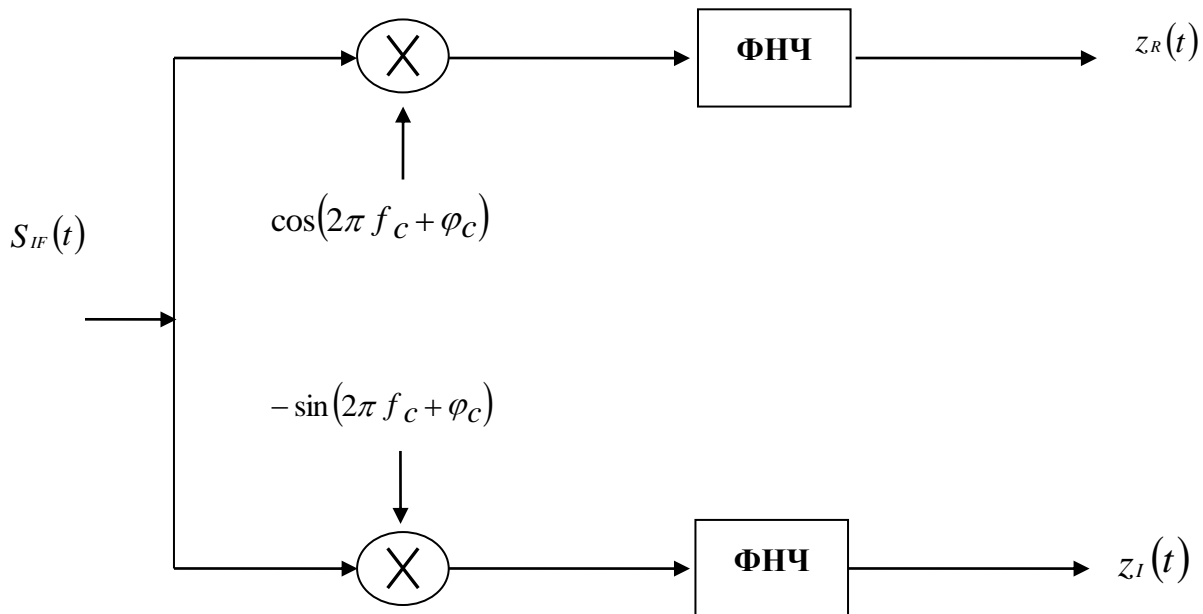


Рис. 1. Квадратурне перетворення сигналу

Потім продукти множення поступають на входи фільтрів нижніх частот (ФНЧ), які призначені для придушення складової в околицях сумарної частоти, що дорівнює  $2f_c + \nu$ .

Прийемо, що фільтр низьких частот характеризується рівномірною амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) для низькочастотних компонентів сигналу.

Полоса пропускання фільтрів  $F$  значно більше тактової частоти сигналу, що приймається [4]:

$$F \gg \frac{1}{T}.$$

Частота опорного сигналу  $f_c$ , як правило, не співпадає з несучою частотою сигналу, що приймається.

Величину  $\nu$  прийемо як зміщення несучої частоти відносно номінального її значення. В такому випадку сигнали на виході фільтра низької частоти  $Z_R(t)$  і  $Z_I(t)$  розглянемо як компоненти комплексного коливання  $z(t) = z_R(t) + j z_I(t)$ , які прийемо як комплексну огинаючу сигнала, що приймається.

Величину  $z(t)$  можна подати в вигляді [4,5]:

$$z(t) = s(t) + w(t),$$

де  $s(t) = e^{j(2\pi\nu + \varphi)} \sum_k d_k h(t - kT - \tau)$  – інформаційна складова сигнала, що приймається;

$\varphi$  – деякий фазовий шум;

$w(t)$  – забарвлений адитивний шум.

При розробці алгоритмів когерентної демодуляції сигналу визначальне значення має рішення проблеми синхронізації.

Комплексна огинаюча сигналу містить невідомі величини  $V, \varphi, \tau$ . Тобто завдання синхронізації фактично зводиться до оцінки істинних параметрів сигналу, що приймається –  $V, \varphi, \tau$ , знання параметрів яких необхідно для демодуляції сигналу  $z(t)$ .

Найкращі результати може дати сумісна оцінка невідомих параметрів сигналу. Однак на практиці реалізувати таку оцінку в каналі з низькою енергетикою і з великою частотною невизначеністю сигналу, що приймається не представляється можливим.

Тому оцінка зміщення несучої частоти сигналу, що приймається відносно номінального значення проводить до того, як включаються інші процедури синхронізації, а саме: синхронізація по фазі і синхронізація по тактовій частоті [3,5].

Складність завдання оцінки несучої частоти в супутниковому каналі усувається наявністю додаткових заважаючих дій «сусідніх каналів» – сигналів з тим же самим типом модуляції і тією ж швидкістю передачі інформації [3,5].

На практиці сигнал «сусіднього каналу» може перевищувати рівень сигналу в основному каналі на 7 дБ, відмінність по частоті «сусіднього каналу» від основного складає величину, що дорівнює  $1/4T$  [6].

Значні складності виникають при реалізації алгоритмів оцінки в пакетному режимі. Це пояснюється тим, що в пакетному режимі синхронізація демодулятора здійснюється по преамбулі, тривалість якої жорстко фіксована.

## 2. Аналіз досліджень і публікацій.

Визначенню основних особливостей сучасних супутникових систем в напрямку підвищення ефективності передачі даних присвячено ряд робіт.

В роботі [2] основним напрямком в якості підвищення ефективності сучасних супутникових систем зв'язку обґрунтовується підвищення енергетики каналів.

В роботі [4], автор пропонує застосовувати низькоорбітальні супутникові системи, що деяким чином девальвує недоліки геостаціонарних систем.

Однак питання проведення загального аналізу геостаціонарних супутникових систем вимагає детального аналізу процесу передачі дискретних даних в них.

Поряд з цим, проведення відповідного аналізу процесу оцінювання несучої частоти, як складової обробки сигналу, що приймається та визначення прийнятих існуючих підходів та методів що до вирішення такого завдання є актуальною науковою задачею.

Безпосередньо питанням оцінки несучої частоти присвячено ряд робіт.

В роботі [8] досліджено багато символічне диференційоване виявлення сигналів різного кодування з фазовим зсувом за наявності випадкових змін частоти та адитивного білого гауссового шуму. Показано, що зміна частоти спотворює переданий сигнал за рахунок ослаблення його амплітуди і введення змінного часу фази до інформаційних символів. Для усунення вказаного недоліку пропонується схема подвійного диференціального кодування фазового зсуву PSK (DDPSK) і наступне багато символічне диференційоване виявлення фазового зсуву за наявності зміщення частоти. Але в статті відсутня оцінка зміни несучої частоти.

Автори роботи [9] пропонують спільну оцінку синхронізації та зсуву несучої та виявлення даних за допомогою фільтра сигналів, ранжованих по важливості в каналах адитивного білого гауссового шуму. В даній роботі отримано зважений байєсівський Крамерський Рао–кордон (WBCRB) для спільного визначення часу та зсуву несучої, який враховує попередній розподіл параметрів оцінки та є точною нижньою межею для всіх розглянутих значень співвідношення сигнал / шум (SNR). Питання врахування сусідніх каналів в статті не розглядаються.

Робота [10] поєднує просту техніку оцінки зміщення частоти (FO) з методом оцінки фазового шуму. Оцінка фазового шуму виводиться з розрахункових коефіцієнтів дискретно-косинусного перетворення. Проаналізовано ряд реалізацій запропонованого алгоритму. Але не враховується вплив «сусідніх» каналів.

В роботі [11] запропоновано спосіб оцінки частоти основного тону мовного сигналу при оптимальній тимчасовій обробці на основі математичної моделі з полігармонічним несучим коливанням при невідомих апріорних розподілах амплітуд і початкових фаз несучих гармонік. Стосовно до розглянутого випадку обчислені точності характеристики оцінки частоти основного тону методом максимальної правдоподібності.

Автором в роботі [12] розглядається спосіб оцінки несучої частоти і часу приходу сигналу по лінійно частотно модульовано-подібній фазокодаваній послідовності. Для реалізації описаного способу оцінки несучої частоти і часу приходу сигналу в статті запропоновано використовувати два узгоджених фільтра незалежно від довжини послідовностей. Зроблено вибір послідовності. Показано, що для розглянутого способу оцінки послідовність Задова – Чу більш краща, ніж послідовність Френка. Розроблений та запропонований в даній роботі спосіб оцінки частоти несучої і часу приходу сигналу придатний для первинної синхронізації при виявленні сигналу в модемах з фазовою і частотною модуляцією. Даний спосіб має меншу обчислювальну складність, в порівнянні з реалізацією гребінки узгоджених фільтрів.

В роботі [13] запропоновано і обґрунтовано алгоритм оцінювання частоти і фази несучого коливання на його дискретних відліках. Результати моделювання показали ефективність алгоритму при малому числі відліків на період коливання і високому рівні адитивного ширококутового шуму. Продемонстровано можливість використання цього алгоритму для управління системою фазового підстроювання частоти в цифрових системах зв'язку.

Автор роботи [14] пропонує підхід до зменшення похибки оцінювання несучої і символічної частоти сигналів з цифровою модуляцією методами, що базуються на аналізі частотних характеристик сигналу. В основу підходу покладено розрахунок першої похідної функції спектральної щільності та пошук нуля ітераційним методом хибного положення.

### **3. Мета дослідження.**

Таким чином, попередній аналіз системи побудови сучасних супутникових систем зв'язку та визначення завдань, щодо оцінювання несучої частоти в них з врахуванням результатів вищевказаного аналізу, а саме необхідністю оцінки несучої частоти до етапу синхронізації по фазі і синхронізації по частоті з врахуванням впливу «сусідніх каналів» для безперервного та пакетного алгоритму передачі даних є актуальною науковою задачею, рішення якої присвячена дана стаття.

### **4. Результати досліджень.**

Існуюча енергетика супутникового каналу зв'язку обумовлює нагальну потребу когерентної обробки сигналу і використання потужного завадостійкого кодування. Система завадостійкого кодування є невід'ємною частиною супутникового модему. У переважній більшості систем використовується надточне кодування з декодуванням за алгоритмом Вітербо та каскадні коди [2, 6]

Широке поширення знаходять турбо коди і коди з малою щільністю перевірок на парність [5]

Хоча в останні роки досить часто в системах супутникового зв'язку (ССЗ) використовуються амплітудно-фазові методи модуляції енергетика супутникового каналу, як правило, зумовлює використання фазової модуляції [3,15].

Найбільш часто використовуються три типи фазової модуляції: ФМ-2, ФМ-4 і ФМ-8. Більшість наземних станцій супутникових систем зв'язку працює в діапазонах 6 або 14 ГГц на передачу і 4 або 11 ГГц на прийом [3,16]. Найпростіший супутниковий канал зв'язку включає в себе дві земні станції супутникового зв'язку і космічну станцію зв'язку, розташовану на борту супутника. Зауважимо, що в даному каналі присутній, принаймні одне

перетворення частоти сигналу. Це перетворення здійснюється в бортовому ретрансляторі супутника зв'язку [3].

Наявність даного перетворення через внутрішню нестабільності опорного генератора–перетворювача частоти бортового ретранслятора супутника зв'язку призводить до випадкового і нестаціонарного зміщення несучого коливання сигналу щодо номінального значення [15]. Це обумовлює частотну невизначеність сигналу.

Весь діапазон частот, в якому працює супутниковий ретранслятор, прийнято ділити на деякі смуги (шириною 27 ... 36, 72 ... 120 МГц), в яких посилення сигналу здійснюється окремим трактом – стовбуром. У стовбурі, в свою чергу, можуть передаватися сигнали багатьох земних станцій супутникового зв'язку. Таким чином, супутниковий ретранслятор може забезпечити зв'язок великого числа абонентів. Тому організація доступу практично незалежних земних станцій в загальній системі зв'язку і оперативне встановлення з'єднань між довільними станціями та багато станційний доступ знаходять широке застосування в ССЗ [5,15,16].

Загалом, є кілька різних шляхів, за допомогою яких багато користувачів можуть надсилати інформацію через супутниковий канал зв'язку. В даний час в ССЗ широко використовуються два типи багато станційного доступу [5,15]:

- багато станційний доступ з частотним поділом каналів (БДЧП);
- багато станційний доступ з тимчасовим поділом каналів (БДТП).

У першому випадку абоненти мережі, розділені по частоті несучого коливання, у другому абоненти мають загальний частотний ресурс, але розділені в часі використання загального частотного тракту.

На базі цих методів поділу каналів, як правило, будуються ССЗ з наданням каналу на вимогу (НКВ). На початку сеансу зв'язку необхідно певним чином здійснити комутацію сигналів на відповідних станціях супутникового зв'язку, виділити абоненту частотний канал або тимчасову позицію. У таких мережах зв'язку можлива відмова у встановленні зв'язку через зайнятість всіх каналів системи [5,15].

Не вдаючись в детальні міркування щодо переваг і недоліків того чи іншого методу розподілу каналів, можна лише відзначити наступне.

Порівняльна простота і низька вартість обладнання, а також великий досвід розробки та експлуатації систем з частотним поділом, накопичений при розробці та експлуатації ранніх систем зв'язку, послужили причиною того, що в переважній більшості в ССЗ в даний час використовується БДЧП. ССЗ з НКВ, що працює з частотним поділом каналів (БДЧП–НКВ), оперують з досить низькими інформаційними швидкостями сигналів.

Як наслідок, в таких системах виявляється можливим використання відносно дешевих супутникових терміналів з малої апертурою класу VSAT (very small aperture terminal) [15].

У системах БДЧП–НКВ використовуються вузько смугові канали. Тому початковий зсув по частоті несучого коливання сигналу може бути порівняний зі смугою каналу [5,15].

Структура ССЗ з частотним поділом каналів вказує на ще одну принципову особливість каналу прийому – наявність додаткових заважають впливів а саме так званих «сусідніх каналів» – сигналів з тим же типом модуляції і тією ж швидкістю передачі, що і основний канал передачі інформації. Так як невизначеність частоти несучого коливання сигналу може бути порівнянна зі швидкістю передачі даних в каналі зв'язку, значна частина спектра «сусіднього каналу» може потрапити в діапазон пошуку демодулятора по несучій частоті [15].

Для ССЗ БДЧП–НКВ необхідний канал управління до функції якого входить виділення абоненту вільного частотного ресурсу. Цей канал не симетричний. Загальний канал від центральної станції до периферійних станцій мережі працює в безперервному режимі Для керуючої інформації кожній периферійній станції мережі в цьому загальному каналі виділяється своя тимчасова позиція. Сигнали від периферійних станцій до центральної станції мережі передаються в пакетному режимі в випадкові моменти часу, займаючи один

фіксований частотний канал. Як наслідок при одночасній передачі сигнали від багатьох користувачів не можна розділити в приймачі [4,5].

У таких каналах використовуються методи з випадковим доступом. Коли кілька користувачів мережі намагаються передати пакети одночасно, пакети перекриваються в часі (накладаються.) Конфлікт, що виникає при накладенні, повинен бути вирішений шляхом використання деяких каналних протоколів для повторної передачі пакетів. У ССЗ найбільше поширення отримав протокол АЛОНА [4,15].

Розглянутий канал управління як правило називається загальним каналом сигналізації [4,15].

З метою аналізу процесу оцінювання несучої частоти визначимо допустиму дисперсію оцінки частоти несучого коливання і проведемо аналіз відомих методів оцінки несучої частоти фазо модульованого сигналу (ФМ сигналу).

Слідє також відмітити, що в працях [16,17,18,19] основна увага приділяється проблемі виявлення інформаційного пакету, а алгоритм оцінки несучої частоти фазо модульованого сигналу описані недостатньо повно.

Когерентність обробки сигналу в демодуляторі обумовлює надзвичайно жорсткі вимоги до точності оцінки фази несучого коливання в відповідній петлі демодулятора з фазово-автоматичним підстроюванням частоти (ФАПЧ демодулятор) [3].

Через це смуга петлі  $B_C$  зазвичай не повинна перевищувати тисячних долів тактової частоти сигналу, що приймається – близько  $10^{-3} 1/T$  [3].

Значення  $B_C$ , як правило, вибирають із міркувань компромісу між рівнем енергетичних втрат демодулятора в заданому діапазоні відношення сигнал/шум на біт інформації і часом входження в синхронізм петлі фазової синхронізації. Чим менше  $B_C$ , тим менше рівень енергетичних втрат демодулятора, тим довше входження в синхронізм. Величина смуги петлі вибирається так, щоб додаткові енергетичні втрати демодулятора не перевищували 0.1 Дб. Виходячи з цих міркувань, величина петлі вибирається зазвичай в значеннях  $B_C \approx 3 * 10^{-3} 1/T$ . А для надійного входження системи авто підстроювання в синхронізм величина дисперсії оцінки несучої частоти ФМ сигналу  $\delta_c^2$  не повинна перевищувати  $B_C^2$ . Тобто величина  $\delta_c^2$  не повинна бути більшою чим  $10^{-5} 1/T^2$  [20].

В подальшому приймемо, що для дисперсії оцінки несучої частоти ФМ сигналу при малих співвідношеннях сигнал/шум на біт інформації (від 0 до 12 Дб) повинна виконуватись наступна вимога [5]:

$$\delta_c^2 T^2 \leq 5 * 10^{-6} . \quad (1)$$

З врахуванням того, що оцінка частоти несучого коливання в безперервному режимі і пакетному режимі здійснюється принципово різними способами, представляється доцільним проводити розгляд методів оцінювання в безперервному і пакетному режимах окремо.

Відомо, що супутникові системи передачі інформації працюють в тому числі і в режимах з випадковим доступом пакетів сигналів [15].

Тобто для них є актуальним синхронізація когерентних фазових демодуляторів, що працюють в пакетному режимі.

Методи синхронізації для цього випадку, що описані в деяких роботах, призначені для демодуляторів систем зв'язку, що працюють з тимчасовим розподілом каналів. Основним недоліком вказаних робіт є те, що розглядаються відносно невеликі по відношенню до смуги сигналу, що передається зміщення несучого коливання, в той час як в реальних сучасних системах зв'язку ці зміщення можуть бути співвідносні з тактовою частотою сигналу, що приймається [5].



Для синхронізації когерентних фазових демодуляторів, що працюють в пакетному режимі прийому, що для синхронізації пакетного демодулятора по несучій частоті на початок преамбули передається відрізок гармонічного сигналу.

Комплексну огинаючу сигналу, що приймається можна подати, як [5]:

$$z(t) = e^{j(2\pi\nu t + \varphi)} + v(t), \quad (2)$$

де  $\nu$  – зміщення несучої частоти відносно номінального значення;

$w(t)$  – комплексний аддитивний гаусівський шум.

Відмітимо, що когерентний прийом дає перевагу по заводо захищеності до 1 дБ для односторонньої фазово-різної модуляції при використанні в сучасних системах супутникового зв'язку багатократної модуляції, коли кількість позицій сигналу досягає 512 варіантів сигналу, то вигода може скласти 5 – 7 дБ.

Таким чином, перспективним є врахування для даного випадку когерентних методів прийому.

Завдання оцінки несучої частоти сигналу, що приймається зводиться до задачі оцінки частоти максимуму в спектрі фрагменту синусоїдального сигналу на фоні аддитивного гаусівського шуму, що впливає з (2).

В даний час відомо достатньо багато методів оцінки частоти синусоїди. Достатньо показовою є робота [20].

Відомо, що найменша дисперсія оцінки визначається кордоном Крамера–Рао [5]. Представляється, що зі всього різноманіття методів оцінки частоти слід вибирати такі, які забезпечують дисперсію оцінки, що співпадає з мінімально граничною дисперсією оцінки (МГД-оцінкою) чи близькою до неї.

Аналіз ефективних оцінок, що забезпечуються різними методами оцінювання частоти синусоїдального сигналу на фоні адитивного білого шуму забезпечує дисперсію оцінки, асимпатично співпадаючої з кордоном Крамера–Рао з ростом співвідношення сигнал/шум.

Оцінка по максимальній подібності (МП – оцінка) частоти синусоїдального сигналу визначається виразом [5,11]:

$$\nu = \arg \left\{ \max_{\nu} \{I(\nu)\} \right\}, \quad (3)$$

$$\text{де } I(\nu) = \left| \sum_n z(t_n) e^{-j2\pi\nu t_n} \right|$$

$$t_n = nT_s;$$

$$n = 1, 2, \dots, N;$$

$T_s$  – період слідування підрахунку комплексної згинаючої сигналу, що приймається;

$NT_s$  – інтервал спостереження.

Фактично  $I(\nu)$  це модуль перетворення Фур'є сигналу, що приймається на інтервалі спостереження.

Величину  $I(\nu)$  називають періодограмою сигналу, що приймається.

Таким чином, знаходження МП – оцінки частоти синусоїдального сигналу зводиться до знаходження максимуму функції  $I(\nu)$  в діапазоні частотної невизначеності сигналу, що приймається. Враховуючи, що супутниковий сигнал зв'язку характеризується значною частотною невизначеністю, безпосереднє знаходження максимуму з виразу (3) вимагає значних обчислювальних задач.

Через це представляється доцільним проаналізувати проблеми реалізації «швидких» методів пошуку розглянутого максимуму.

В даний час найбільш широко застосовують два підходи до знаходження максимуму періодограми сигналу.

Перший підхід заснований на використанні методів авто кореляційного аналізу, другий – на використанні алгоритмів дискретного перетворення Фур'є.

Перевага першого підходу складається в відносно прості процедурі обчислення. Однак, при малих відношеннях сигнал/шум більш ефективним є методи, побудовані на основі дискретного перетворення Фур'є.

Процедура знаходження максимуму періодограми на основі дискретного перетворення Фур'є включає в себе [21]:

1. Обрахування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)  $N_f$  і знаходження максимуму:

$$m_f = \arg \max_k \{|I_k|\},$$

$$\text{де } I_k = \frac{1}{N_f} \sum_{n=0}^{N_f-1} z(t_n) * \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N_f}\right).$$

2. Знаходження максимуму  $I(v)$ , найближчого до  $km_f$ , визначення  $\bar{v}$  такого, що

$$\bar{v} = \arg \left\{ \max_v \{I(v)\} \right\}.$$

Визначена вище процедура фактично є двоетапною.

Процедуру першого етапу зазвичай приймають як процедуру грубої оцінки. Її точність обмежена ШПФ [5, 21].

Для реалізації другого етапу можна використати ряд методів, які визначаються як методи інтерполяції розрахунків перетворення Фур'є сигналу, що приймається. Ці методи характеризуються достатньою обчислювальною простотою. Однак дисперсія оцінки частоти, яку забезпечують методи інтерполяції при малих співвідношеннях сигнал/шум програє кордону Крамер–Рао.

Тому для реалізації алгоритму оцінки з найбільшою ефективністю в якості процедури другого етапу доцільно використовувати методи пошуку максимуму, які також реалізуються на основі перетворення Фур'є [12].

До загального недоліку відомих процедур оцінки, оснований на використанні ШПФ слід віднести те, що їх реалізація потребує первинного накопичення даних для наступного здійснення алгоритму обчислення.

Це надає додаткову затримку в реалізацію процедури оцінки.

В пакетному режимі додаткова затримка є істотним недоліком, так як обмежена довжина преамбули пакета накладає жорсткі обмеження на довго тривалість процедури обробки. Томі цікавість представляють методи оцінки, оснований на рекурентних обчислювальних процедурах, які суміщають обробку і накопичення сигналу, що приймається.

Однак дисперсія оцінок, які забезпечують вказані методи, як показано в [23,24] істотно програє кордону Крамера–Рао.

В даний час відомий ряд методів оцінки частоти синусоїдального сигналу, в основі якого лежать рекурентні процедури. Такі наприклад, як метод Писаренко, Метод MUSIK, метод авто регресії [21,25].

З врахуванням супутникового каналу (велика частотна невизначеність, низька енергетика, наявність заважаючих дій в вигляді гаусівського шуму і завад типу «сусідній

канал») і необхідності когерентної обробки сигналу до даного часу є актуальною проблемою синхронізації цифрового фазового демодулятора.

При реалізації процедур синхронізації в супутниковому каналі визначальне значення має синхронізація несучої частоти. При цьому завдання розробки алгоритму оцінки несучої частоти ФМ сигналу в когерентних демодуляторах сучасних систем супутникового зв'язку має велике значення.

Завдання дослідження має на суті розробку алгоритму оцінки, що враховують властивості супутникового каналу зв'язку, і проведення за допомогою нього дослідження ефективності запропонованих рішень.

### **5. Обговорення результатів проведеного дослідження.**

Таким чином, в якості основних напрямків роботи по створенню алгоритму оцінки несучої частоти можна сформулювати наступні:

1. Розробити алгоритм оцінки несучої частоти ФМ сигналу для когерентних демодуляторів супутникових систем зв'язку, який би забезпечив оптимальну чи близьку до оптимальної оцінку.

Для цього необхідно:

- визначити потенційні кордони дисперсій одержаних оцінок;
- розробити алгоритм оцінки несучої частоти ФМ сигналу, що враховує специфіку супутникового каналу зв'язку;
- розробити реалізаційні процедури оцінювання на базі ШПФ, при цьому для пакетного демодулятора запропонувати таку процедуру оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається, яка б забезпечувала, з одного боку простоту апаратної реалізації, а з другого боку – оптимальну асимптотичну оцінку.

2. Дослідити ефективність оцінок, одержуваних при використанні запропонованих процедур оцінювання несучої частоти ФМ сигналу, методом комп'ютерного моделювання.

Для цього необхідно:

- розробити імітаційні моделі сигналів і перешкод, що враховує специфіку супутникового каналу зв'язку, включаючи наявність «сусідніх каналів»;
- побудувати залежності одержуваних дисперсій оцінок від відносини сигнал/шум на біт інформації і зіставити отримані дисперсії з потенційними кордонами;
- в процесі моделювання визначити мінімально необхідну довжину інтервалу спостереження, яка б забезпечила необхідну ефективність оцінювання (виконання умови (1)) в діапазоні відношення сигнал/шум на біт інформації (від 0 до 12 дБ).

3. Показати реалізованість запропонованих алгоритмів і їх ефективність в діючих ССЗ.

Для цього необхідно:

- показати апаратну реалізацію розроблених процедур оцінювання несучої частоти ФМ сигналу на базі сучасних цифрових сигнальних процесорів і тим самим показати реалізуємість розроблених процедур в реальному масштабі часу;
- провести стендові випробування запропонованих алгоритмів оцінювання;
- провести натурні випробування апаратури, що використовує запропоновані алгоритми оцінювання несучої частоти ФМ сигналу, в діючій системі супутникового зв'язку.

### **6. Висновки**

1. Для розглянутих ССЗ характерна вкрай низька енергетика каналу, значна частотна невизначеність сигналу та наявність «сусідніх каналів»;

2. Для підвищення ефективності їх використання необхідна когерентна обробка сигналу в демодуляторі та використання потужного завадостійкого кодування;

3. Для систем супутникового зв'язку з багато станційним доступом з частотним поділом каналів – наданням каналу на вимогу необхідний множинний доступ і надання каналу на вимогу та робота, як в безперервному, так і в пакетному режимах;

4. Для проведення оцінки несучої частоти необхідно розробити алгоритм оцінки несучої частоти ФМ сигналу для когерентних демодуляторів супутникових систем зв'язку,

які б забезпечили оптимальне чи близьке до оптимальних оцінки, та провести відповідну оцінку методом комп'ютерного моделювання.

### Список використаної літератури

1. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее / Кукк К.И. –М: Горячая линия, 2015. –262 с.
2. Крылов А.М. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития. / А.М. Крылов –М: Радио и связь, 2014. –182 с.
3. Бойко Ю.М. Аналіз цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв'язку та передачі інформації /Ю.М. Бойко Ю.М., Н.М. Сворінь // Вісник Хмельницького національного університету. –2011. –№1. –С. 103-110.
4. Довгополий А. С. Удосконалення систем супутникової навігації озброєння та військової техніки в умовах впливу навмисних перешкод / А. С. Довгополий, С. О. Понамаренко, В. В. Твердохлібов, О. О. Білобородов // Озброєння та військова техніка. – 2018. –№1(17). –С. 67–71.
5. Брусин Е. А. Оценка несущей частоты ФМ сигналов в демодуляторах спутниковых систем связи / Е. А. Брусин // Электросвязь. –2007. –№5. –С. 12–13.
6. Павленко М.П. Реалізація декодера Вітербі на FPGA для систем супутникового зв'язку / Павленко М.П., Бичков В.Є., Правда В.І. // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". 75 Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. –2012. –№49. – С. 71–75.
8. Rabiei A.M., Frequency offset invariant multiple symbol differential detection of MPSK. // A.M. Rabiei, N.C. Beaulieu // IEEE Trans. Commun. –2011. –№59(3). –С.652–657.
9. Nasir A.A. Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer-rao bounds / A.A. Nasir, S Durrani, R.A. Kennedy // IEEE Trans. Commun. –2012. –№60(5). –С.1407–1419.
10. J. Bhatti Low-complexity frequency offset and phase noise estimation for burst-mode digital transmission in Proc. / J. Bhatti, N. Noels, and M. Moeneclaey // IEEE PIMRC. –Toronto. – 11-14 September 2011. –С.1662–1669.
11. Булгаков О.М., Голубинский А.Н. Оценка частоты основного тона речевого сигнала методом максимального правдоподобия при известном распределении амплитуд и начальных фаз гармоник сложного несущего колебания / О.М. Булгаков, А.Н. Голубинский // Вестник ВИ МВД России. – 2010. –№ 2. –С. 154-162.
12. Пузырёв П. И. Способ оценки частоты несущей и времени прихода сигнала по ЛЧВ-подобной фазокодированой последовательности / П. И. Пузырёв, С. А. Завьялов // Динамика систем, механизмов и машин. Омский государственный университет. – 2017. –Том 5, № 4. –С. 250 - 264.
13. Лучинин А. С. Алгоритм оценки и восстановления частоты и фазы несущего колебания в цифровой связи / А. С. Лучинин, М. П. Трухин // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016). Сборник научных трудов по материалам I Международной конференции. – Екатеринбург. –5–6 мая 2016 г. –С. 126–127.
14. Нагорнюк О. А. Покращення точності оцінювання несучої та символної частоти сигналів з цифровою модуляцією / О. А. Нагорнюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: Зб. наук. праць ЖВІ НАУ. – 2013. –Вип. 8. – С. 62–70.
15. Горбатий І.В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія / І.В. Горбатий. –Львов: СПОЛОМ, 2011. –612 с.
16. INTELSAT. INTELSAT EARTH STANDARTS (ISS) Perfomance characteristics for broadband VSAT (BVSAT) digital carriers // Document IESS–313 (Rev.A) APPROVAL DATE: 08 August 2000. –2000.

17. Lee L.N. Digital processor-based programmable BPSK(QPSK) offset-QPSK modems / Lee L.N., Shenoy A., Eng M.K. // *Comsat Technical Review*. –1989. –№ 2 (vol. 19). –P. 57-64
18. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium. / С. И. Макаренко // *Системы управления, связи и безопасности*. –2018. –№4. –С. 1–34.
19. Gardner F.M. Hangup in phase-lock loops / F.M. Gardner // *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-25. – Stanford. – Oct.1977. –P. 1210-1214.
20. Шестаков А. Л. Оценка несущей частоты случайной последовательности импульсов методом Прони / А. Л. Шестаков, А. С. Семенов, О. Л. Ибряева. // *Вестник ЮУрГУ*. –2009. – №37(170). –С.106-115.
21. Саломатин С. Б. Цифровая обработка сигналов в радиоэлектронных системах // С. Б. Саломатин. – Минск.: БГУИР, 2002. –87 с.
22. Aziz W. Performance Analysis of Carrier Frequency Offset (CFO) in OFDM using MATLAB / W. Aziz, E. Ahmed, G. Abbas, S. Saleem, Q. Islam. // *Journal of Engineering (JOE)*. – 2012. – Vol. 1, № 1. – P. 5–10.
23. Kootsookos P. Fast, Accurate Frequency Estimators / E. Jacobsen, P. Kootsookos // *IEEE Signal Processing Magazine*. –2007. – Vol. 24, № 3. – P. 123-125.
24. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем / А.И. Перов. – М: Радиотехника, 2012. –240 с.
25. Шелухин О. И., Цифровая обработка и передачи речи / О. И. Шелухин, Лукьянцев Н. Ф. – М: Радио и связь, 2000. –345 с.

#### References

1. Kukk K.I. (2015) *Satellite Communications: Past, Present, Future*. Moscow, Hotline, 262 p.
2. Kryilov A.M. (2014) *Satellite communications and broadcasting systems. Status and development prospects*. Moscow, Radio and communications. 182 p.
3. Boyko Yu.M. Svorin N.M. (2011) *Analysis of digital modulation / demodulation methods in communication and information transmission systems*. Bulletin of the Khmelnytsky National University. 1.P.103–110.
4. Dovgopoly A.S. Ponomarenko S.O., Tverdohlibov V.V., Beloborodov O.O. (2018) *Improvement of satellite navigation systems of weapons and military equipment under conditions of intentional interference*. Weapons and military equipment. 1 (17). P. 67–71.
5. Brusin E. A. (2007) *Estimation of the carrier frequency of FM signals in demodulators of satellite communication systems*. Telecommunication. 5. P.12–13.
6. Pavlenko M.P., Bychkov V.E., Pravda V.I. (2012) *Implementation of Viterbi decoder on FPGA for satellite communication systems*. Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI" 75 Series: Radio Engineering. Radio engineering. 49. P.71–75.
8. Rabiei A.M., Beaulieu N.C. (2011) *Frequency offset invariant multiple symbol differential detection of MPSK*. IEEE Trans. Commun. 59(3). P.652–657.
9. Nasir A.A. Durrani S., Kennedy R.A. (2012) *Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer-rao bounds*. IEEE Trans. Commun. 60(5). P.1407–1419.
- 10 Bhatti J., Noels N., and Moeneclaey M. (2011) *Low-complexity frequency offset and phase noise estimation for burst-mode digital transmission* in Proc. IEEE PIMRC. Toronto, 11-14 September 2011. P.1662–1669.
11. Bulgakov O.M., Golubinskiy A.N. (2010) *Estimation of the frequency of the fundamental tone of a speech signal by the maximum likelihood method with a known distribution of amplitudes and initial phases of harmonics of a complex carrier oscillation*. Bulletin of the VI Ministry of Internal Affairs of Russia. 2. P. 154—162.
12. PuzyrYov P. I., Zavyalov S. A. (2017) *A method for estimating the carrier frequency and signal arrival time using an FNL-like phase-coded sequence*. Dynamics of systems, mechanisms and machines. Omsk State University. Vol 5, 4. P. 250–264.

13. Luchinin A. S., Truhin M. P. (2016) Algorithm for estimating and recovering the frequency and phase of the carrier wave in digital communication. *Computer Image Analysis: Intelligent Solutions in Industrial Networks (CAI-2016): Collection of scientific papers on the materials of the I International Conference, Yekaterinburg, May 5–6 2016.* P.126–127.
14. Nagornyuk O.A. (2013) Improving the accuracy of estimating the carrier and symbol frequency of signals with digital modulation. *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems: Coll. of sciences. Iss. 8.* P. 62–70.
15. Gorbatiy I.V. (2011) *Systems for Remote Sensing of the Earth from Space: Monograph Lviv: SPOLOM.* 612 p.
16. INTELSAT. INTELSAT EARTH STANDARDS (ISS) Performance characteristics for broadband VSAT (BVSAT) digital carriers // Document IESS–313 (Rev.A) APPROVAL DATE: 08 August 2000.
17. Lee L.N. Shenoy A., Eng M.K. (1989) Digital processor-based programmable BPSK(QPSK) offset-QPSK modems. *Comsat Technical Review.* 2 (vol. 19). P.57-64.
18. Makarenko S. I. (2018) Opisatel'naya model sistemyi sputnikovoy svyazi Iridium. // Makarenko S. I. *Sistemyi upravleniya, svyazi i bezopasnosti.* 4. P. 1–34.
19. Gardner F.M. (1977) Hangup in phase-lock loops. *IEEE Transactions on Communications,* vol. COM-25. Stanford, Oct.1977. P. 1210-1214.
20. Shestakov A. L., Semenov, A. S. Ibryaeva O. L. (2009) Estimation of the carrier frequency of a random pulse sequence by the Prony method. *Bulletin YuUrGU.* 37(170). P.106–115.
21. Salomatin S. B. (2002) *Digital signal processing in electronic systems.* Minsk, BGUIR. 87 p.
22. Aziz W. . Ahmed E., Abbas G., Saleem S., Islam Q. (2012) Performance Analysis of Carrier Frequency Offset (CFO) in OFDM using MATLAB. *Journal of Engineering (JOE).* Vol. 1, 1. P. 5–10.
23. Jacobsen E., Kootsookos P. (2007) Fast Accurate Frequency Estimators. *IEEE Signal Processing Magazine.* Vol. 24, 3. P. 123-125.
24. Perov A.I. (2012) *Fundamentals of building satellite radio navigation systems.* Moscow, Radio Engineering. 240 p.
25. Sheluhin O. I., Lukyantsev N. F., edited by. O. I. Sheluhina. (2000) *Digital processing and voice transmission.* Moscow, Radio and communications. 345 p.