

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



ВІСНИК

ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

ВИПУСК 4

***BULLETIN OF ENGINEERING
ACADEMY OF UKRAINE***

Issue 4

**ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE**

Журнал друкує статті науковців вузів та установ України, інших країн відповідно до рубрик:

Авіаційна і космічна техніка
Військово-технічні проблеми
Геологія, видобування та переробка корисних копалин
Інженерні проблеми агропромислового комплексу
Інформаційні системи, обчислювальна й електронна техніка, системи зв'язку та приладобудування
Матеріалознавство
Машинобудування
Медична інженерія
Металургія
Охорона навколишнього середовища (інженерна екологія) і ресурсозбереження
Стандартизація, метрологія і сертифікація
Будівництво та будіндустрія
Технологія легкої промисловості
Технологія харчової промисловості
Хімічні технології й інженерна біотехнологія
Економіка, право та керування в інженерній діяльності
Енергетика
Освіта та виховання

Journal submits articles of researchers of universities and institutions of Ukraine and other countries in accordance with headings:

Aviation and Space Engineering
Military-technical problems
Geology, Mining and Processing of Minerals
Engineering Problems of Agroindustrial Complex
Information systems, computers and electronic equipment, communication systems and instrumentation
Material Science
Mechanical Engineering
Medical Engineering
Metallurgy
Preservation of Environment (Ecological Engineering) and Resource Saving
Standardisation, Metrology and Certification
Building and Construction Engineering
Technology of Light Industry
Technology of Food Industry
Chemical Technologies and Engineering Biotechnology
Economics, law and management in engineering
Energetics
Education and training

Матеріали друкуються українською, російською або англійською мовами.

Materials are submitted in Ukrainian, Russian or English languages.

Номер затверджено на засіданні Вченої ради Кіровоградського національного технічного університету

The issue is approved at the meeting of Academic Council of Kirovograd National Technical University

Протокол № 2 від 2.11.2016р
Вісник Інженерної академії України включений у новий Перелік наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук в галузі технічних наук (Наказ МОН України від 13.07.2015р. №747)

Protocol No.2 dated 2.11.2016
Bulletin of Engineering academy of Ukraine is included into the new List of Scientific special editions of Ukraine, in which results of dissertation works may be published for to be conferred with academic degrees of doctor and candidate of sciences in the field of engineering sciences (Decree of Ministry Education and Science of the Ukraine No.747 dated 13.07.2015)

Співзасновники:
Кіровоградський національний технічний університет
Інженерна академія України
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Cofounders:
Kirovograd National Technical University
Engineering Academy of Ukraine
Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

ISSN 2519-8793

Редакційна колегія:

Головний редактор – д.т.н., проф. **В.П. Квасніков**
Відповідальний секретар – к.т.н. **В.І. Савченко**
Редактор – **А.С.Глуханюк, К.В.Потопчук**

Члени редколегії:

А.І. Бабушкін – д.т.н., проф. (авіаційна і космічна техніка),
Л.Р. Вишняков – д.т.н. (матеріалознавство),
Р.Б. Гевко – д.т.н., проф. (машинобудування),
В.Л. Дикаш – д.т.н., проф. (економіка, право та управління в інженерній діяльності),
В.В. Древецький – д.т.н., проф. (інформаційні системи, обчислювальна й електронна техніка, системи зв'язку та приладобудування),
Ігор Емрі – доктор, проф. (директор Інституту стійких інноваційних технологій, Словенія),
М.Ю. Ізбаиш – д.т.н., проф. (будівництво і будіндустрія),
Л.В. Коломієць – д.т.н., проф. (стандартизація, метрологія і сертифікація),
В.І. Литвиненко – д.х.н. (хімічні технології та інженерна біотехнологія),
А.П. Мельник – д.т.н., проф. (нафтогазові тех.ї),
В.М. Мельник – д.т.н., проф. (геологія, добування та переробка корисних копалин),
Й.С. Мисак – д.т.н., проф. (енергетика),
О.О. Панасенко – д.т.н., проф. (водне господарство і гідротехніка),
В.В. Соловей – д.т.н., проф. (охорона навколишнього середовища і ресурсозбереження),
В.І. Ступа – д.т.н., проф. (технологія легкої промисловості),
О.К. Тришин – академік УААН, д.с/г.н., проф. (інженерні проблеми АПК),
М.І. Хвусюк – д.м.н., проф. (медична інженерія),
О.І. Черевко – д.т.н., проф. (технологія харчової промисловості),
М.І. Черновол – член-кор. УААН, д.т.н., проф. (матеріалознавство),
С.Л. Ярошевський – д.т.н., проф. (металургія).

Editorial board:

Editor-in-chief – Dr. of Eng., Prof. **V.P. Kvasnikov**
Executive secretary – Cand. of Eng. **V.I. Savchenko**
Editor – **A.S. Glukhaniuk, K.V. Potapchuk**

Members of editorial board:

A.I. Babushkin – Dr. of Eng., Prof. (Aviation and Space Engineering),
L.R. Vyshniakov – Dr. of Eng (Material Science),
R.B. Gevko – Dr. of Eng., Prof. (Mechanical Engineering),
V.L. Dykan' – Dr. of Eng., Prof. (Economics, law and management in engineering),
V.V. Drevets'kyi – Dr. of Eng., Prof. (Information systems , computers and electronic equipment , communication systems and instrumentation),
Ihor Emri – Dr., Prof. (Director of the Institute of sustainable innovative technologies, Slovenia),
M.Yu. Izbush – Dr. of Eng., Prof. (Building and Construction Engineering),
L.V. Kolomiets – Dr. of Eng., Prof. (Standardisation, Metrology and Certification),
V.I. Lytvynenko – Dr. of Chem. (Chemical Technologies and Engineering Biotechnology),
A.P. Melnyk – Dr. of Eng., Prof. (Oil-and-Gas Technologies),
V.M. Melnyk – Dr. of Eng., Prof. (Geology, Mining and Processing of Minerals),
I.S. Mysak – Dr. of Eng., Prof. (Power Engineering),
O.O. Panasenko – Dr. of Eng., Prof. (Water management and hydraulic engineering),
V.V. Solovey – Dr. of Eng., Prof. (Preservation of Environment (Ecological Engineering) and Resource Saving),
V.I. Stupa – Dr. of Eng., Prof. (Technology of Light Industry),
O.K. Tryshyn – academician of UAAS, Dr. of agriculture, Prof. (Engineering Problems of Agroindustrial Complex),
M.I. Khvysuk – Dr. of Med., Prof. (Medical Engineering),
O.I. Cherevko – Dr. of Eng., Prof. (Technology of Food Industry),
M.I. Chernovol – A corresponding-member of UAAS, Dr. of Eng., Prof. (Material Science),
S.L. Yaroshevsky – Dr. of Eng., Prof. (Metallurgy).

Підписано до друку 4.11.2016р.

Ціна договірної

Адреса редакції: просп. Космонавта Комарова, 1,
корп. 11, кімн. 402, м. Київ, 03680, Україна
Тел.: +38(044)406-71-58
E-mail: kvp@nau.edu.ua

Signed for printing on 4.11.2016р.

Agreed price

Address of Editorial Staff: Cosmonaut Komarov St., 1,
build. 11, 402 room, Kyiv, 03680, Ukraine
Tel.: +38(044)406-71-58
E-mail: kvp@nau.edu.ua

Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Шарапов Д.Д. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПІРОСКОПІВ У ЯКОСТІ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОМПЛЕКСУ СТАБІЛІЗАТОРА ОЗБРОЄННЯ	76
Брезкин А.Л., Кучеров Д.П. ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ РАДІОСИГНАЛУ ЗА ЦИФРОВИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ	80
Квасніков В.П., Рудик А.В. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ MEMS – АКСЕЛЕРОМЕТРА	86
Коваленко Ю.Б. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	93
Древецкий В.В., І.М. Ковела, В.М. Кутя ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ МЕТОДОМ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЗА КОМПЛЕКСОМ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ	97
Дуднік А.С. ДИНАМІЧНИЙ АЛГОРИТМ У ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПОТОКУ ЗАЯВОК В БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ	102
Ільчук С.В., Лазарев Ю.Ф., Мироненко П.С. АЛГОРИТМИ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ НА ГРУНТІ РІВНЯННЯ ПУАССОНА	105
Квасніков В.П., Діхтєвський О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ГОЛОВОК НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ.	110
Коваленко Ю.Б., Бурлака М.В. ЕТАПИ І МЕТОДИ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ САЙТУ	113
Коваленко Ю.Б., Рибалка Л.П. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗБЕРІГАННЯ, ПОШУКУ, СТРУКТУРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ	116
Коваленко Ю.Б., Терещук В.А. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗАГРОЗ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ В ІНТЕРНЕТ СЕРЕДОВИЩІ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ	119
Міщенко А.В., Басюк І.О., Приходько Т.Ю. РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ ЗАЩИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ	122
Лісовець С.М. ФОРМУВАННЯ ПАКЕТІВ СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ НА П'ЄЗОКЕРАМІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ	127
Любченко В.В. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОМПОНЕНТУ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА	132
Михайленко В.В., Святненко В.А., Чуняк Ю.М., Петрученко О.В., Чарняк О.С., Вдов Т.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДВАНАДЦЯТИПУЛЬСОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ШЕСТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ	136
Семенова К.І. АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ДАНИХ РСА ПЕРЕДНЬО-БОКОВОГО ОГЛЯДУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ	139
Собчак А.П., Попова О.И. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРОДУКЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	144

УДК 621.37.037

Березин А.І., ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України
Кучеров Д.П., НА

ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ РАДІОСИГНАЛУ ЗА ЦИФРОВИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

В статті розглядаються методи проведення спектрального аналізу радіоефіру, що можуть бути корисні при застосуванні в панорамних вимірювачах. Основні уваги в статті приділяється структурному аналізу методів для створення перспективного пристрою радіомоніторингу. На підставі проведеного аналізу запропонована класифікація методів за часом пошуку радіосигналу. Аналізується можливість повного цифрового оброблення прийнятих сигналів в комп'ютері користувача. Наводяться асимптотичні верхні оцінки часових витрат методів оброблення.

Ключові слова: радіосигнал, панорамний приймач, вимірювання частоти, цифрове оброблення, пошук максимуму

Вступ

Сучасне суспільство не можливо уявити без засобів передачі і прийому радіосигналів. Як двадцять років тому приймання та передавання радіосигналів, в основному, асоціювалося з громадським радіо і телебаченням, то зараз положення докорінно змінилося. Джерела та приймачі радіосигналів буквально зрослися з повсякденним життям людини, проникли у різні галузі господарства і промисловості. Це мобільний зв'язок та інтернет, Wi-Fi пристрої, радіокеровані пристрої, радіонавігація і інше. Одночасно стають актуальними заходи контролю за використанням цих радіопристроїв. З метою забезпечення неперервного функціонування державних, військових комерційних радіомереж і систем здійснюється постійний радіомоніторинг. Питому вагу набуває радіомоніторинг у військової справи, складовою частиною є радіорозвідка. Під час виконання бойових завдань задіється кілька тисяч радіоелектронних засобів кількох сотень типів. Ситуація з вимірюванням ускладнюється використанням ширококутових сигналів та псевдовипадковим переналаштовуванням сигналів за частотою. При цьому вимірювальні засоби повинні бути ширококутовими та швидкодіючими.

Радіомоніторинг здійснюється багатьма радіотехнічними пристроями, до яких відносять сканувальні радіоприймальні пристрої, селективні мікрровольтметри, цифрові аналізатори спектра, панорамні радіоприймальні пристрої та панорамні вимірювальні приймачі [1 – 3]. Їх застосування особливо корисне при спостереженні за використанням радіосигналів у деякій смузі частот, визначенні завантаженості спостережуваного діапазону, виявленні паразитних випромінювачів, визначенні напруженості поля в точці прийому від різних випромінювачів, визначенні виду випромінювачів, параметрів випромінювачів та проведення їх ідентифікації, калібрування генераторів радіосигналів. Найбільш поширеним пристроєм є радіоприймач, який здійснює вимірювання несучої частоти радіосигналу.

Вхідний сигнал вимірювального засобу являє собою сукупність амплітуд сигналів, що мають різні частоти. Вимірювані частоти знаходяться в діапазоні від сотні кілогерц до десятків гігагерц. Точність результатів вимірювання залежить як від аналізованого коливання, так і від методу вимірювання. Дослідження значення відносної точності складають $10^{-3} - 10^{-4}$ за інтервал вимірювання. Сучасні вимоги до точності вимірювання при радіомоніторингу є як найменше на порядок вищими. Сучасні підходи щодо вимірювання радіосигналів спираються на повністю цифрове подання вхідних сигналів. Необхідність перетворення широкого частотного діапазону залишає у структурі панорамного приймача аналоговий підсилювач-перетворювальний тракт, вихідний сигнал якого на проміжній частоті перетворюється у цифровий сигнал та у подальшому підлягає цифровому обробленню на ПЕОМ. Теоретичні основи та практична реалізація військових засобів радіотехнічної розвідки наведена в [4]. Відповідно до [5] точність вимірювання несучої частоти НВЧ радіосигналів за допомогою компараторів не перевищує відносної похибки 10^{-3} при відношенні сигнал-шум більшим 0 дБ. Моделювання вимірювання несучої частоти радіосигналів в середовищі MATLAB проведене авторами в [6] на основі розробленої цільової функції методом дихотомії дозволило отримати відносну точність 10^{-5} для відношення сигнал-шум порядку 25 дБ. Введення методу дихотомії зменшує час вимірювання. Можливість уточнення визначення несучої частоти за рахунок створення багатоканального цифрового приймального пристрою розглянуто в [7]. Метою статті є аналіз методів вимірювання частоти радіосигналів та визначення ефективних підходів для підвищення точності результату вимірювання.

Постановка завдання

Нехай вимірювальна приймальна система, що може складатися ширококутового вхідного перетворюючого пристрою, забезпечує прийом корисного сигналу $s(t)$ на фоні адитивної завади $u(t)$.

$$s(t) = y(t) + \gamma(t), \tag{1}$$

де $y(t)$ – сигнал на вході приймального засобу, $\gamma(t)$ – завада гаусового типу з нульовим середнім. Корисний сигнал $s(t)$ характеризується вектором параметрів, серед яких найбільшу зацікавленість в умовах задачі, що розглядається, викликають амплітуда та частота. Це дозволяє подати сигнал $y(t)$ у вигляді [6]

$$y(t) = \text{Re}\{S(t)\exp(j\varphi)\exp(j2\pi Ft)\}, \tag{2}$$

де $S(t)$ – миттєве значення амплітуди сигналу в момент часу t , F – частота, вимірювальний параметр приймального сигналу. Вважається, що параметри сигналу $S(t)$ та F є апіорі невідомі, але можуть знаходитися в інтервалах

$$\underline{S} \leq S(t) \leq \bar{S}, \quad \underline{F} \leq F \leq \bar{F}, \tag{3}$$

де \underline{S} , \bar{S} , \underline{F} , \bar{F} – задані границі інтервалу визначення вимірюваних параметрів S та F відповідно.

В статті ставиться та вирішується завдання визначення методів оцінювання параметру f прийнятого сигналу в умовах апіорної невизначеності щодо дійсних їх значень, що задані в формі (3), для побудови вимірювального тракту панорамного приймача.

Методи вимірювання

Як відомо [8, 9], для радіосигналу $s(t)$, заданого в формі (2), вимірюваний параметр f є неенергетичним, тому є дійсним правило визначення

$$z(\hat{F}) = \max_f z(s(t)), \tag{4}$$

де \hat{f} – оцінка невідомого параметру f . Відповідно до цього правила система вимірювання складається з набору кореляторів, на входи яких паралельно подається вхідна реалізація $s(t)$, а в якості опорного сигнал використовується його копія $s(t, f_i)$, де $i = 1, \dots, N$. Така схема є класичним розрізнячем N сигналів рівної енергії за правилом максимальної правдоподібності. Цей підхід відповідає традиційній схемі вимірювання, яка базується на порівнянні невідомого параметру прийнятого сигналу з деяким еталонним, точне значення якого отримується шляхом оброблення вихідної інформації від вимірювальних фільтрів.

Безпосередньо з (4) впливає схема багатоканального методу визначення частоти сигналу на основі використання N смугових фільтрів Φ , які налаштовані на приймання радіосигналу у межах визначеної частотної смуги, рис. 1.

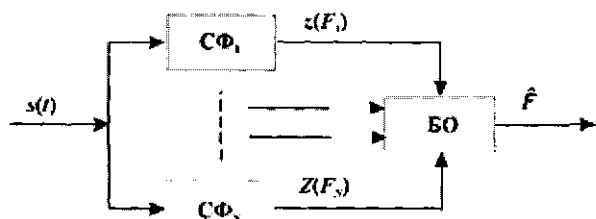


Рис. 1. Структурна схема N -смугового приймача

Максимальний сигнал на виході Φ_i визначає найбільш близький до сигналу $s(t)$ смуговий фільтр з центральною частотою f_i , точне значення якої розраховується блоком обчислення БО. Похибка вимірювання ΔF є частотним розлагоджуванням, яка не перевищує половини смуги пропускання фільтру. Недоліком методу є необхідність використання великої кількості

фільтрів, смуги яких не повинні перекриватися, але повинні примикати одна до одної та мати високу вибірковість, що отримати в широкій смузі достатньо складно. З метою збільшення точності вимірювання частоти за цим методом використовують багатоступеневе вимірювання, при якому спочатку визначають грубе (первинне) значення частоти, а потім уточнюють його за допомогою додаткових ступенів чи методів.

Еквівалентний спосіб визначення несучої за рахунок електронного переналаштування частоти гетеродину при супергетеродинному прийманні радіосигналів має назву «гетеродинного» методу пошуку, який використовується в панорамних приймачах (рис. 2).

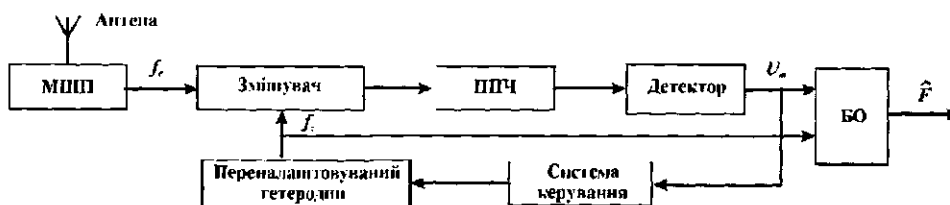


Рис. 2. Гетеродинний метод визначення несучої

У цьому випадку маємо один фільтр (ППЧ), який налаштований на фіксовану частоту, переналаштовуваний за лінійним законом гетеродин перетворювача частоти. Вимірювана частота визначається частотою гетеродину, амплітуда S сигналу $s(t)$ вимірюється на виході ППЧ. За рахунок електронного переналаштовування ідентичні смугові канали формуються послідовно в часі. В даній підході можна реалізувати достатньо високу точність, але він програє багатоканальному за часом пошуку.

Метод частотного розділення може бути реалізований на вибіркових фільтрах та смугових підсилювачах; гіромагнітних ЗІГ-фільтрах; дисперсійних лініях затримки; акустооптичних модуляторів світла; частотно-залежних лініях затримки [3, 4].

Визначення несучої частоти на основі гіромагнітних ЗІГ-фільтрів засновано на резонансних явищах у фериті. Переналаштовування резонансної частоти фільтра здійснюється зміною зовнішнього магнітного поля. Структурна схема частотного аналізатору на резонансних контурах приведена на рис. 3.

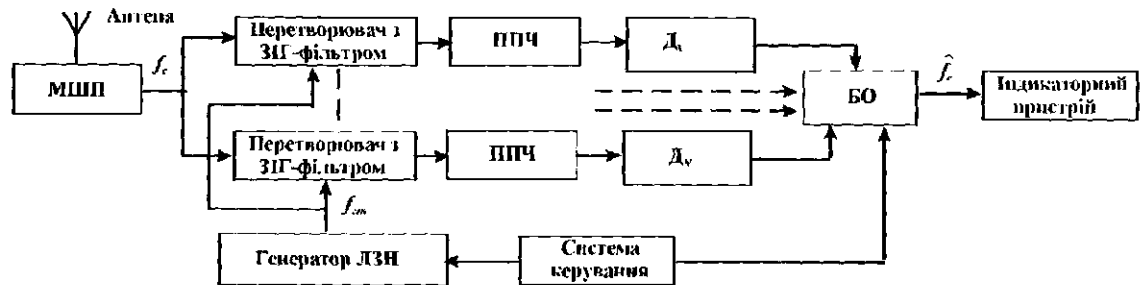


Рис.3. Структурна схема приймача на ЗІГ-резонаторі

Переналаштовування ЗІГ-фільтра здійснюється генератором лінійно змінюваної напруги (ЛЗН). Розрізнення корисного сигналу між виходами фільтрів визначається параметрами резонансної системи. Збільшення швидкості огляду діапазону здійснюється за рахунок зменшення точності визначення частоти сигналу. Це є основним недоліком методу. Наслідком цього є розширення смуги пропускання, зменшення рівню вихідного сигналу, погіршення співвідношення сигнал / шум. Перевагами методу є висока вибірковість, широкий діапазон перебудови, простота управління перебудовою частоти. Недоліки – втрапає у фільтри, великий рівень бокових паразитних резонансів.

Вимірювання частоти може здійснюватися створенням стоячої хвилі у короткозамкненому кінці хвилеводу. Цей метод вимірювання називають інтерференційним. При цьому правило максимальної правдоподібності трансформується у знаходження положення мінімуму стоячої хвилі у хвилеводі, рис. 4.

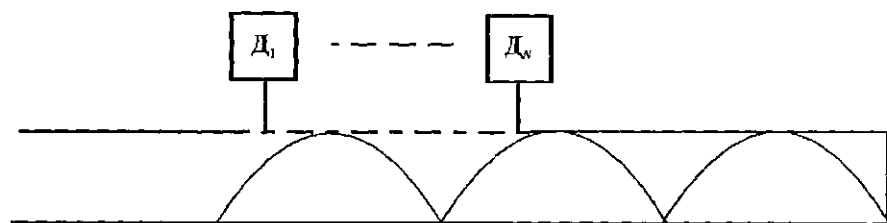


Рис. 4. Принцип створення стоячої хвилі у хвилеводі

Безпошуковість забезпечується підключенням набору вимірювальних головок D , місце підключення яких відповідає вимірюваним частотам певного НВЧ-діапазону. Цей підхід використовується в лабораторних дослідженнях НВЧ-генераторів. Фазовий метод ґрунтується на визначенні різниці фаз $\Delta\phi$ при проходженні радіосигналу по двом хвилеводним лініям різної довжини, рис. 5.

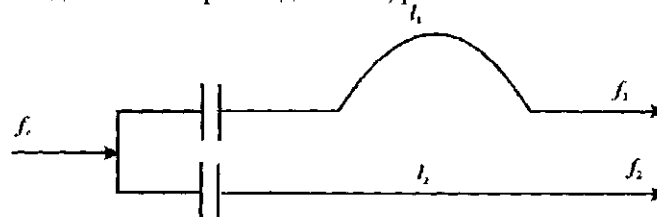


Рис. 5. Фазовий метод вимірювання несучої частоти

Різниця фаз пропорційна частоті вимірюваного сигналу

$$f = K\Delta\varphi. \quad (6)$$

В (6) коефіцієнт пропорційності K визначається різницею довжини ліній. Перевагою методу є миттєве визначення частоти сигналу, а недоліком є залежність визначення частоти від точності виміру різниці фаз. Існує декілька підходів щодо реалізації цього методу. Наприклад, вимірювання різниці фаз може здійснюватися за допомогою фазового моста чи кількох ліній затримки, які реалізують цифрове подання зсуву фаз тощо.

Легкий спосіб визначення частоти дає звичайна дискретизація сигналу $s(t)$ з частотою $f_d \gg f_c$. Кількість дискретних відліків N , що попадають в інтервал вимірювання $\Delta\tau$, дозволяє визначити шукану частоту за формулою

$$\hat{f} = \frac{N}{\Delta\tau}. \quad (7)$$

За розглянутими методами можна скласти узагальнену класифікаційну схему методів за часом пошуку несучої частоти радіосигналів, рис.6. Слід зазначити, що при комбінації розглянутих методів можна отримати більш точні результати вимірювання.

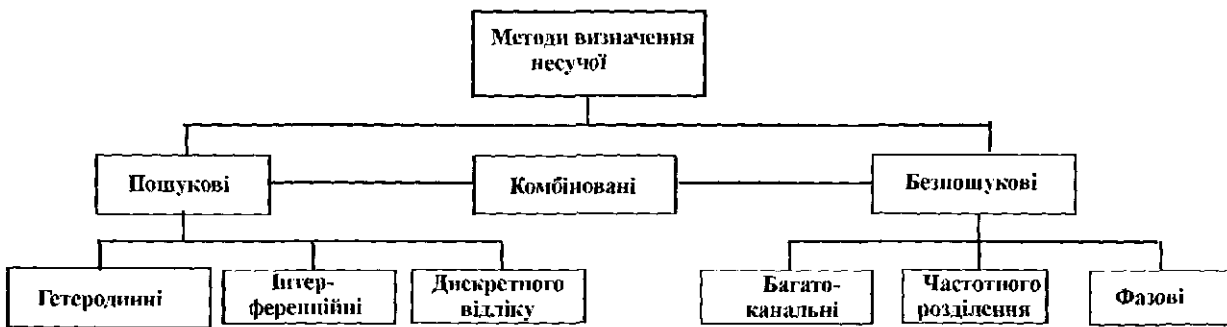


Рис.6. Класифікація методів визначення несучої

Розглянуті методи відносяться до класу інструментальних, вони характеризуються великими масогабратними показниками, споживчою потужністю, недостатньою точністю та швидкістю для вирішення завдань радіомоніторингу. Узагальнені характеристики методів вимірювання приведені в таблиці. Дані таблиці показують, що пошукові методи мають більшу точність, ніж миттєві, але програють їм за часом вимірювання. Аналіз наведених методів вказує на наявність двох окремих трактів в панорамному вимірювачі: приймального, який характеризується чутливістю, вибірковістю та смугою вимірювання, та обчислювального, де розраховується числове значення вимірюваного параметру сигналу.

Така побудова відповідає структурі сучасної системи радіозв'язку на основі SDR (software-defined radio) приймачів, в якій комп'ютер є елементом оброблення сигналів в цифровій формі [10]. Ідеальна структура такого приймача складається з антени, аналого-цифрового перетворювача та комп'ютера, оснащеного відповідним програмним забезпеченням. Пропонована структура приймального пристрою для визначення несучої показана на рис. 7.



Рис.7. Структура пропонованого приймача

Вона відрізняється від ідеального наявністю блоків малошумлячого підсилювача (МШП) та швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), які додані в схему для забезпечення вибіркової, точності та швидкості вимірювання.

Порівняльна характеристика методів вимірювання

Метод	Швидкість	Точність	Смуга	Недоліки	Частотне розрізнення
Багатоканальний	миттєвий	$\pm F_n/2$	середня	низька точність	низьке
Гетеродинний	пошуковий, тривалий	$\pm 10^{-3}$	широка	великий час виміру	високе
Частотне розділення	миттєвий	± 5 МГц	широка	невеликий динамічний діапазон, велика похибка виміру.	середнє
Резонансний	середній за темпом пошуку	$\pm 10^{-4}$	середня	великий час вимірювання	високе
Інтерференційний	середній за темпом пошуку	$\pm 10^{-4}$	вужька	великий час вимірювання	високе
Фазовий	миттєвий	$\pm 10^{-2}$	вужька	важко вимірювати імпульсні сигнали	високе
Дискретного відліку	пошуковий	$\pm(\delta_{\text{кв}}+1/f_{\text{хт}})$	широка	складно вимірювати поодинокі імпульси.	високе

Цифрове оброблення

В приймачі радіосигнал розкладається на синфазну $I(t)$ і квадратурну $Q(t)$ складові, які подальшому перетворюються у цифрову форму [11, 12]:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [I(t) \cos(\omega t) + Q(t) \sin(\omega t)] d\omega.$$

Перетворення (8) реалізується за традиційною схемою змішувач-гетеродин. Приймальний сигнал від антени проходить через смуговий фільтр, з якого далі поступає на пару змішувачів, на входи яких опорного генератора LO приходять сигнали однакової амплітуди з відносним зсувом фази на 90° . Структурна схема пристрою показана на рис. 8.

Цифрова форма сигналу отримується за допомогою АЦП, де відбувається дискретизація за часом квантування сигналів за рівнем. Цифровий I/Q-образ радіосигналу підлягає перетворенню у частотну форму за допомогою, наприклад, швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Основним компонентом обчислювального програмного забезпечення є модулі, що створюють список прийнятих сигналів і визначають їх параметри. Точність вимірювання несучої суттєво залежить від частоти дискретизації і кількості точок для ШПФ. Складність цього алгоритму не перевищує асимптотичної верхньої оцінки $O(N \log N)$ [13], де N – число точок перетворення.

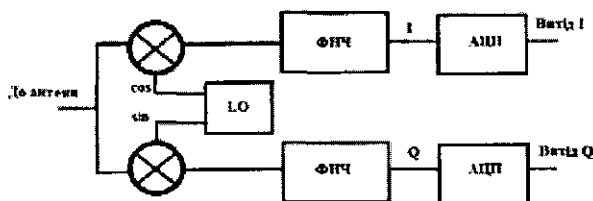


Рис. 8. Структура приймального тракту вимірювального приймача

Відповідно до правила (4), коли за сформованим списком отриманих сигналів, шуканий параметр відповідає його максимальному значенню, можна запропонувати декілька алгоритмів пошуку максимуму, до яких можна віднести: перебірний, створення дерева пошуку та функції [13]. Алгоритм прямого перебору пошуку максимуму записується у формі

$$\hat{f} = \max_{f \leq f \leq f} f[n],$$

де n – частотний відлік сигналу. Метод є тривалим при великій кількості сигналів, оскільки проводиться порівнянням пар сусідніх значень амплітудно-частотного спектра, починаючи з першого відліку у списку. За методом створюється послідовність $f_1 < \dots < f_N$. Обчислювальні витрати оцінюються асимптотичною верхньою оцінкою $O(N^2)$. Інший підхід реалізується на основі проходження

решу, якщо уявити створюваний набір гармонік бінарним деревом. рис. 9. Виконання алгоритму пошуку здійснює прохід по дереву від кореню до шуканого листа.

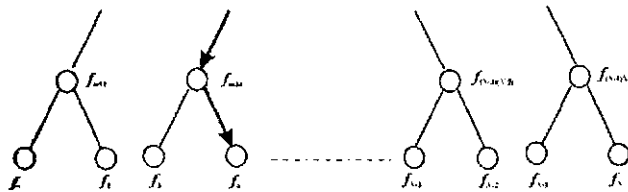
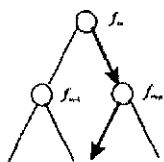


Рис. 9. Пошук по бінарному дереву

Відповідно до рис. 9 максимальна частота f_m знаходиться за маршрутом $f_m \rightarrow f_{m-p} \rightarrow \dots \rightarrow f_4 \rightarrow f_1$. Початкова частота обирається довільно з інтервалу $\underline{f} \leq f \leq \bar{f}$. Порівняння відбувається із частотами сусідніх інтервалів.

Оскільки частоти не повторюються, в наборі завжди є гармоніки максимальної та мінімальної амплітуди. За деревом максимальне значення знаходиться не порівнянням сусідніх відліків, а сусідніх інтервалів. Верхня асимптотична оцінка обчислювальних витрат визначається як $O(N \lg N)$, яка є меншою ніж пряме перебирання за (9) при великих N .

Якщо уявити, що набір частот зберігається в комірках певної області пам'яті та шуканий параметр f_m займає певну комірку, то можна обчислити частоту f_m шляхом введення так званої «хеш-функції» $h(f_m)$, яка встановлює відповідність між значенням шуканого параметру та полями хеш-таблиці, утвореної комірками пам'яті $U[0 \dots M-1]$

$$h(f_m) \xrightarrow{T} U[0, 1, \dots, M-1]. \quad (10)$$

Один з варіантів такої функції може бути поданий записом визначення залишку від ділення на інтервал допустимих комірок M :

$$h(\hat{f}) = \hat{f} \bmod M. \quad (11)$$

Відповідно до (11) можна значно скоротити час пошуку вимірюваного параметру. Але цей метод є ефективним для вимірювання сигналів з відомими параметрами. Перевагою (11) є швидке обчислення, яке здійснюється за фіксований час та не залежить від обсягу інтервалу пошуку. Верхня асимптотична оцінка обчислювальних витрат цього підходу позначається $O(1)$.

Висновки.

В статті розглянуто технології вимірювання частоти сигналів, що використовуються при проведенні радіомоніторингу і включають аналіз інструментального та алгоритмічного забезпечення. Відповідно до проведеного аналізу встановлено, що основними вимогами до панорамних вимірювачів є точність та смуга пошуку. В статті запропонована структура вимірювача на основі розкладу приймального сигналу на квадратури, перетворенні його в цифрову форму і подальшому обробленні прийнятого сигналу у частотній площині при перетворенні його у цифрову форму. З метою зменшення габаритних характеристик, споживчої потужності, високої повторюваності при серійному використанні пропонується застосовувати радіоприймач в комплекті з персональним комп'ютером, на якому встановлене відповідне програмне забезпечення. Складовими частинами програмного забезпечення є модулі створення списку радіосигналів та пошуку максимального сигналу на основі алгоритмів пошуку, більш швидкими серед них є алгоритми напрямленого пошуку несучої частоти, детальне дослідження яких є напрямком майбутніх досліджень.

Література

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 640 с.
2. Ашихмин А.В. Особенности построения и технические характеристики панорамных измерительных приёмников семейства «Аргомак» / А.В. Ашихмин, А.В. Козьмин, Е.Л. Король и др. // Спецтехника и связь. - №3. – 2008. – С. 50-59.
3. Мартынов В.А. Панорамные приёмники и анализаторы спектра / Под ред. Г.Д. Заварица. – М.: Сов. радио, 1980. – 352 с.
4. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка / Ю.А. Смирнов. – М.: Воениздат, 2001. – 456 с.
5. Николаев А.Н. Цифровые технологии в широкополосных приёмниках СВЧ радиосигналов / А.Н. Николаев // Вестник ЮУрГУ. - № 35. – 2012. – С. 30-34.
6. Нагорнюк А.А. Автоматизированное определение параметров цифровых радиосигналов с закруглёнными формами фазовых созвездий / А.А. Нагорнюк, А.А. Писарчук // Научный вестник НГТУ. – Т.56. – № 3. – 2014. – С. 79-87.
7. Николаев А.Н. Алгоритмы измерения несущей частоты в цифровых приёмниках при субдискретизации радиосигналов / А.Н. Николаев, А.А. Белугина // Евразийский союз учёных. Технические науки. - №4 (13). – 2015. – с. 160 – 163.