

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ШИРОКОСМУГОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ

Мірських Г.О., Могильний С.Б.

Розглянуті методи широкодіапазонного пошуку і перетворення частоти безперервних та імпульсно-модульованих сигналів. Запропоновані алгоритми керування вузлами перетворювача, які дозволяють досягти однозначності результату при мінімальних апаратних витратах.

Вступ

Задача широкосмугового пошуку та дослідження сигналу (з метою вимірювання його частоти, аналізу спектра, тощо) була і залишається однією з найважливіших при створенні апаратури різноманітного призначення. При цьому однією з перших доводиться розв'язувати задачу перетворення частоти. Якщо можливий діапазон зміни частоти досліджуваних сигналів значний (наприклад, від одиниць до десятків гігагерц), то перетворювач частоти, як правило, будується за найпростішою схемою, яка в найбільшій мірі відповідає умовам широкодіапазонності. Це призводить до необхідності аналізувати продукти перетворення сигналів, з метою отримання інформації про комбінаційні складові вищого порядку. Одержану інформацію при подальшій обробці сигналів враховують тим чи іншим способом для інтерпретації результатів дослідження.

Постановка задачі

Для розв'язання вказаної задачі більш часто використовують один із двох методів побудови перетворювача частоти, які відрізняються один від одного характером перестроювання частоти гетеродину. Перший метод полягає в плавному перестроюванні частоти гетеродину - точніше крок перестроювання частоти гетеродину (Δf_G) значно менший смуги пропускання ($\Delta f_{ПЧ}$) підсилювача перетвореної частоти (ППЧ). При цьому гетеродин перестроюється в діапазоні частот (Δf_G) значно меншому від діапазону можливої зміни частоти досліджуваних сигналів. Такий метод перетворення частоти зазвичай називають *комбінованим*.

При реалізації другого методу гетеродин перестроюється дискретно, причому крок перестроювання його частоти мало відрізняється від смуги пропускання ППЧ, а діапазон частот, в якому перестроюється гетеродин, практично співпадає з діапазоном можливої зміни частоти вхідних сигналів. Цей метод перетворення частоти зазвичай називають *гетеродинним*.

Відомо [1], що при поданні на входи перетворювача частоти досліджуваного сигналу і сигналу гетеродина з частотами f_c и f_r , відповідно, на його виході можлива наявність сигналів з частотами

$$f_{пч} = |\pm mf_c \pm nf_r|, \quad (1)$$

де m, n – цілі числа ($m, n \geq 1$).

Оскільки амплітуда досліджуваного сигналу, як правило, мала (в тому числі за рахунок застосування схеми регулювання рівня), а робочий цикл перестроювання гетеродина здійснюється в напрямку від нижньої граничної частоти діапазону $f_{нг}$ до верхньої $f_{вг}$, співвідношення (1) можна записати як

$$f_{пч} = f_c - nf_r. \quad (2)$$

При реалізації гетеродинного методу задача зводиться до виключення реєстрації на виході перетворювача компонент, які обумовлені вищими ($n > 1$) гармоніками частоти гетеродина. В той же час, при реалізації комбінованого методу задача полягає в побудові такого алгоритму, який дозволяв би визначити номер гармоніки гетеродина, яка дає на виході перетворювача необхідні компоненти.

Алгоритмізація комбінованого методу перетворення частоти

Якщо перестроювання гетеродина здійснюється в діапазоні частот Δf_r від $f_{нг}$ до $f_{вг}$ лінійно зі швидкістю v і $\Delta f_{пч} \ll \Delta f_r$, то для забезпечення безперервного перекриття діапазону частот Δf_c досліджуваного сигналу

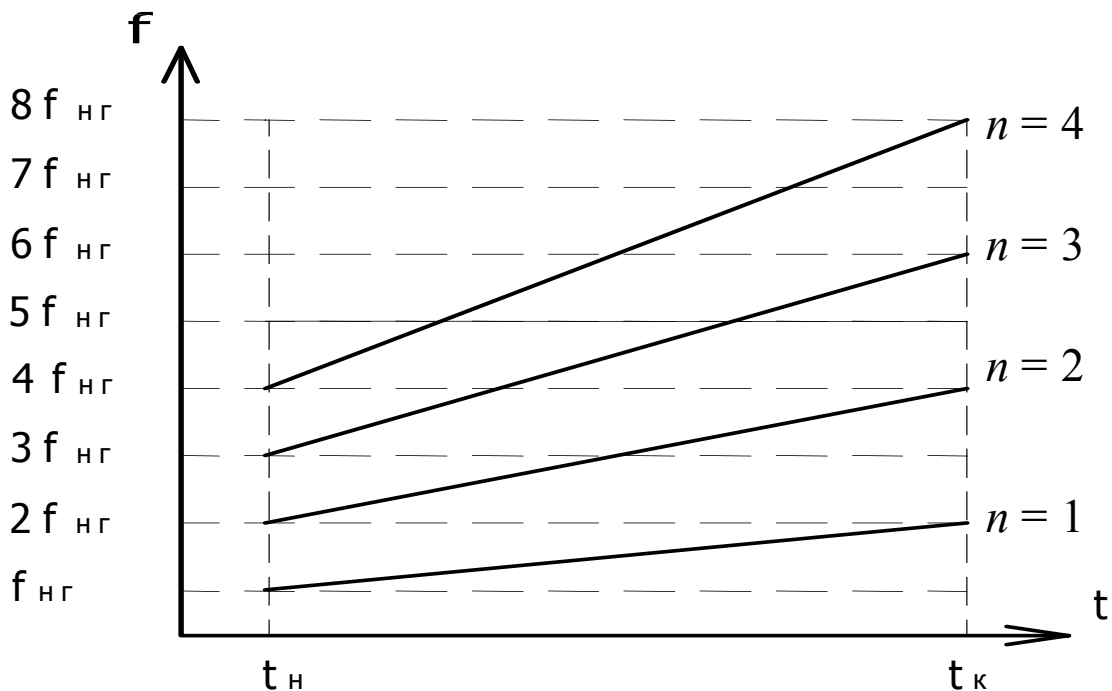


Рис. 1

необхідно, щоб $f_{HG} < f_{BG} / 2$. Залежність частоти гетеродина від часу (характеристика перестроювання) для різних значень n наведена на рис. 1.

З рис. 1 видно, що за час $\Delta t = t_K - t_H$ величина зміни частоти гармонік гетеродина різна і залежить від номера гармоніки, що розглядається. Дійсно, за вказаний відрізок часу величина зміни частоти становить

для 1-ї гармоніки - $\Delta f_{\Gamma 1} = 2f_{HG} - f_{HG} = f_{HG}$,

для 2-ї гармоніки - $\Delta f_{\Gamma 2} = 4f_{HG} - 2f_{HG} = 2f_{HG}$,

для 3-ї гармоніки - $\Delta f_{\Gamma 3} = 6f_{HG} - 3f_{HG} = 3f_{HG}$,

для 4-ї гармоніки - $\Delta f_{\Gamma 4} = 8f_{HG} - 4f_{HG} = 4f_{HG}$.

Узагальнюючи наведені дані приходимо до висновку, що величина зміни частоти для n -ї гармоніки гетеродина становитиме

$$\Delta f_{\Gamma n} = 2nf_{HG} - nf_{HG} = nf_{HG}.$$

Тобто швидкість зміни частоти гармонік гетеродина, які дають необхідні компоненти на виході перетворювача, збільшується пропорційно збільшенню номера гармоніки. Зауважимо, що, не порушуючи безперервного перекриття діапазону можливої зміни досліджуваного сигналу, діапазон необхідної зміни частоти гетеродина можна зменшити при переході від більш низьких гармонік до більш високих за рахунок збільшення початкової частоти (f_H) його перестроювання у відповідності з нерівністю

$$f_H \leq 2(n-1)f_{HG}.$$

При реалізації даного методу в процесі перестроювання гетеродина на виході перетворювача утворюються продукти перетворення частоти у вигляді пар імпульсів, як показано на рис.2. При цьому тривалість кожного імпульсу і часовий інтервал між ними при заданих і незмінних параметрах ППЧ однозначно визначається номером гармоніки гетеродина, яка обумовила появу даних продуктів перетворення.

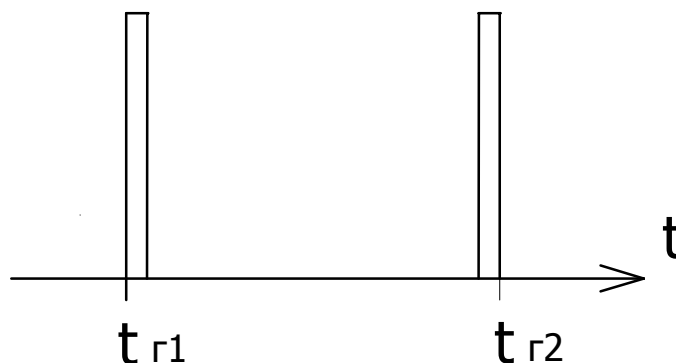


Рис. 2

Таким чином, якщо в процесі перестроювання гетеродина реєструється сигнал $f_{ПЧ1}$ (відповідає моменту часу $t_{Г1}$), то необхідно продовжити процес перестроювання до отримання сигналу $f_{ПЧ2}$ (відповідає моменту часу $t_{Г2}$). Вказана процедура дозволяє сформувати імпульс, тривалість якого $\tau = t_{Г2} - t_{Г1}$. Значення τ однозначно визначає номер гармоніки гетеродина, "відповідальної" за отримання вказаних відгуків. Для подальшого

оброблення сигналу, перестроювання гетеродина необхідно або припинити, що дає можливість працювати з сигналом частоти

$$f_{пч2} = nf_{Г} - f_{С},$$

або продовжити (але в сторону зменшення частоти) до отримання відгуку частоти

$$f_{пч1} = f_{С} - nf_{Г}.$$

Номер гармоніки (при відповідній настройці схеми керування) визначається, як

$$n = \text{int}[(f_{пч2} - f_{пч1}) / (\nu\tau)].$$

Зауважимо, що розглянутий алгоритм дозволяє дослідити не лише безперервні коливання, але і послідовності радіоімпульсів, при цьому період T імпульсів в послідовності повинен задовольняти умові

$$T \leq \frac{\Delta f_{пч}}{n\nu},$$

а тривалість послідовності має бути більша часу, необхідного для виконання всіх операцій, передбачених алгоритмом роботи.

При практичній реалізації комбінованого методу перетворення частоти необхідно врахувати особливості технічних характеристик окремих вузлів перетворювача (в першу чергу гетеродина і ППЧ), а також характер сигналів, що аналізуються.

Найбільший вплив на точність визначення n мають нелінійність характеристики перестроювання гетеродина, стабільність ППЧ в частині таких його вихідних параметрів, як смуга пропускання і центральна частота, а також девіація частоти $\Delta f_{д}$ досліджуваного сигналу. Вказані фактори обмежують можливість впевненої реєстрації великих (більше 6 - 7) значень n , і, як слідство, обмежують допустиму верхню частоту сигналів, які поступають на вхід перетворювача (наприклад, при необхідності отримання інформації про частоту сигналу). Для нейтралізації негативної дії цих факторів необхідно внести корекцію в визначення граничних частот і модифікувати алгоритм перестроювання гетеродина.

Скореговані граничні частоти діапазону перестроювання гетеродина потрібно визначити як

$$F_{нг} \leq (f_{нг} - \frac{3}{2} \Delta f_{пч} - \Delta f_{д} / 2),$$
$$F_{вг} \leq (f_{вг} + \frac{3}{2} \Delta f_{пч} + \Delta f_{д} / 2),$$

а модифікований алгоритм його перестроювання необхідно організувати так, щоб пошук вхідного сигналу здійснювався послідовно на кожній (по-

чинаючи з першої) гармоніці сигналу гетеродина. Для реалізації такого алгоритму в початковий момент пошуку вхідного сигналу необхідно задати апріорі контрольне значення часового інтервалу τ_1 , яке відповідає 1-й гармоніці і при перестроюванні гетеродина до значення $F_{вг}$ всі відмінні від τ_1 значення часового інтервалу вважати хибними; потім повторити процедуру пошуку при контрольному значенні часового інтервалу τ_2 , яке відповідає 2-й гармоніці гетеродина і т.д. до тих пір, поки отримане значення часового інтервалу не співпаде з контрольним. Природно, що при цьому збільшиться час аналізу сигналу. Величину цього зростання можна зменшити, якщо врахувати розглянуту раніше можливість зменшення діапазону перестроювання частоти гетеродина з переходом від $(n - 1)$ -ї гармоніки до n -ї.

Алгоритмізація гетеродинного методу перетворення частоти

Гетеродинний метод перетворення частоти будується на основі гетеродина, перестроювання якого здійснюється дискретно. Частотна характеристика такого гетеродина, як правило, дуже нерівномірна. Потужність вихідного сигналу гетеродина на різних частотах може відрізнятися в десятки разів. Це, з однієї сторони, створює серйозні складнощі, пов'язані з необхідністю вилучити вплив вищих гармонічних складових на результати дослідження вхідного сигналу, з іншої сторони робить можливим підняти (і суттєво) чутливість перетворювача частоти в значній частині діапазону можливої зміни частоти вхідного сигналу. Найбільш повно використати вказані особливості дозволяє запропонований в [2] метод, який базується на аналізі тестових послідовностей. Ці послідовності є k -бітовими двійковими числами, сформованими в результаті аналізу сигналу (за принципом "так" – "ні") на виході перетворювача частоти при k послідовних настроюваннях гетеродина (в старшому розряді такої послідовності завжди повинна бути 1, оскільки формування послідовності починається лише після реєстрації на виході перетворювача сигналу перетвореної частоти).

Прийmemo, для визначеності, крок перестроювання гетеродина рівним $f_{оп}$. Для безперервного перекриття діапазону частот вхідного сигналу при реалізації методу аналізу тестових послідовностей необхідно, щоб виконувались нерівності

$$\left. \begin{aligned} f_{оп} < \Delta f_{пч} < 2f_{оп}, \quad f_{нпч} < 0,5f_{оп}, \\ 1,5f_{оп} < f_{впч} < 2f_{оп}, \quad f_{нпч} > (2f_{оп} - f_{впч}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $f_{нпч}$, $f_{впч}$ – відповідно, нижня і верхня граничні частоти смуги пропускання ППЧ.

Для ідентифікації номера гармоніки гетеродина, яка обумовила наявність сигналу на виході перетворювача, мінімальне число розрядів k в тестовій послідовності повинно бути рівне

$$k = \text{int}[2f_{\text{ВПЧ}} / (nf_{\text{ОП}})] + 1.$$

Таким чином, при виконанні нерівностей (3)

$$\begin{aligned} k &= 4 \text{ для } n = 1; \\ k &= 2 \text{ для } n = 2, 3; \\ k &= 1 \text{ для } n \geq 4. \end{aligned}$$

Для визначення кодів, які відповідають вказаним тестовим послідовностям, розглянемо взаємне розміщення частоти f_c вхідного сигналу і значень частоти гетеродина, які розміщуються один за одним (рис. 3).

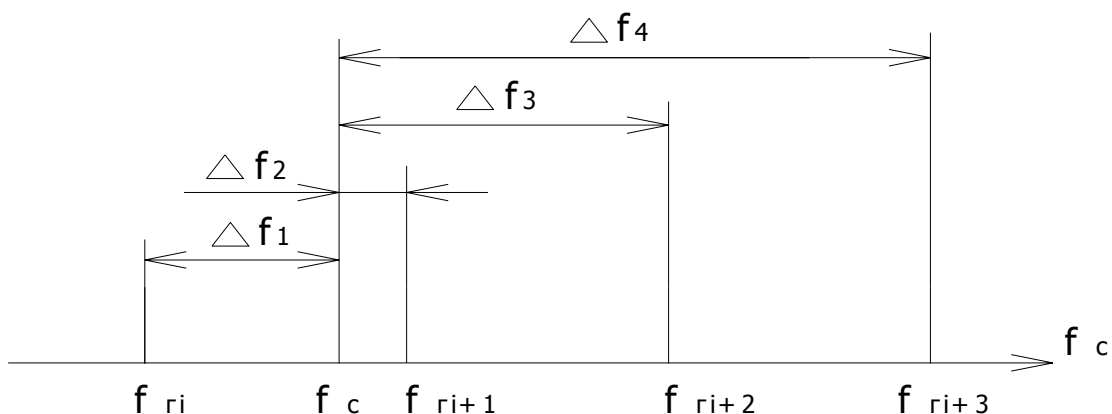


Рис.3

Оскільки побудова тестової послідовності починається лише після реєстрації на виході ППЧ сигналу перетвореної частоти, завжди (при будь-яких значеннях n) залишається справедливим співвідношення

$$0,5f_{\text{ОП}} < \Delta f_1 < 2f_{\text{ОП}}.$$

Чотирьохрозрядним кодом (який відповідає чотирьохрозрядній тестовій послідовності), в старшому розряді якого завжди присутня 1, в загальному випадку може бути описано вісім можливих варіантів розподілу наявності або відсутності сигналу перетвореної частоти на виході ППЧ, а саме: 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111. При цьому, вочевидь, що при

$$f_{\text{ВПЧ}} < 2f_{\text{ОП}}$$

код 1001 (наявність сигналів перетвореної частоти при настроюванні гетеродина на частоти, які відрізняються на $4f_{оп}$) не може бути отриманий ні при яких значеннях n . Коди 1000 и 1100 можуть бути отримані лише у випадку, якщо "відстань" між послідовними налагодженнями гетеродина буде більшою (або рівною) $2f_{оп}$, що відповідає отриманню сигналу перетвореної частоти при $n \geq 2$.

В таблиці 1 наведені можливі значення кодів (для $n = 1, 2, 3$) в залежності від співвідношень між величинами $\Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4$ і $f_{НПЧ}, f_{ВПЧ}$.

Таблиця 1

Номер гармоніки	Кодові послідовності				
	$ \Delta f_2 < f_{НПЧ}$ $\Delta f_3 < f_{ВПЧ}$ $\Delta f_4 < f_{ВПЧ}$	$ \Delta f_2 < f_{НПЧ}$ $\Delta f_3 < f_{ВПЧ}$ $\Delta f_4 > f_{ВПЧ}$	$ \Delta f_2 > f_{НПЧ}$ $\Delta f_2 < f_{ВПЧ}$ $\Delta f_3 < f_{ВПЧ}$ $\Delta f_4 < f_{ВПЧ}$	$ \Delta f_2 > f_{НПЧ}$ $\Delta f_3 < f_{ВПЧ}$ $\Delta f_4 > f_{ВПЧ}$	$\Delta f_2 < f_{ВПЧ}$ $ \Delta f_3 < f_{НПЧ}$ $\Delta f_4 < f_{ВПЧ}$
$n = 1$	1011	1010	1111	1110	1101
$n = 2$	1100	1100	1100	1100	1100
$n = 3$	1000	1000	1100	1100	1100

При $n > 3$ можливою, як уже відзначалось, є лише одна тестова послідовність, якій відповідає код 1000.

З наведеної таблиці бачимо, що продуктам перетворення, отриманими при $n = 1$ і при $n > 1$, відповідають різні коди. Це дає можливість запропонувати наступний алгоритм роботи розглянутого перетворювача:

- гетеродин перестроюється від самої низької до самої високої частоти свого діапазону;
- після первинної появи сигналу перетвореної частоти починається формування тестової послідовності (за допомогою аналізу стану виходу ППЧ при трьох послідовних настроюваннях гетеродина);
- проводиться ідентифікація отриманих кодів, а саме: якщо код рівний 1100 або 1000, то перестроювання гетеродина продовжується до отримання наступного сигналу перетвореної частоти; якщо код рівний 1011, 1010, 1111, 1101, 1110, то гетеродин необхідно перестроїти на значення частоти, при якому отримане перше значення тестової послідовності, а перетворювач перевести в режим аналізу сигналу. Відзначимо, що однозначний висновок про належність продуктів перетворення, які спостерігаються, першій гармоніці в чотирьох з п'яти

вказаних ситуацій, а саме при кодах – 1011, 1010, 1111, 1110 можна зробити вже з аналізу результатів перших трьох настроювань гетеродина; аналогічно можна зробити висновок про належність продуктів перетворення вищим гармонікам гетеродина після отримання коду 1000.

Запропонований метод дозволяє реалізувати максимальну (для даного рівня вихідного сигналу гетеродина та даних параметрів ППЧ) чутливість перетворення частоти. Відзначимо, що розглянутий метод перетворення частоти, дозволяє здійснити оброблення послідовності радіоімпульсів, період перемикування яких не перевищує час зупинки гетеродина на кожній частоті його діапазону перестроювання. Більш того, при фіксації частоти гетеродина (наприклад, на значенні $f_{Г0}$) з'являється можливим дослідження одиночного радіоімпульсу, при умові, що частота f_c його заповнення знаходиться в межах

$$(f_{Г0} + f_{ППЧ}) \leq f_c \leq (f_{Г0} + f_{ВПЧ}).$$

Можливе значення девіації частоти досліджуваного сигналу при даному методі перетворення визначається як

$$\Delta f_d \leq (f_{ППЧ} + f_{ВПЧ} - f_{ОП}).$$

Висновки

Порівняльний аналіз розглянутих методів перетворення частоти сигналів дозволяє розробити ряд рекомендацій для практичного застосування того чи іншого методу в конкретних умовах.

1. Комбінований метод дозволяє обробляти сигнали з більш широким діапазоном можливої зміни частоти; характеризується більш простим виконанням гетеродина і підсилювача перетвореної частоти. З метою підвищення завадостійкості перетворювача частоти бажано застосування послідовного пошуку вхідного сигналу на кожній із гармонік гетеродина. При цьому зменшення діапазону перестроювання гетеродина по ходу збільшення номера гармоніки відчутно зменшує втрату швидкодії досліджуваного сигналу.

2. Гетеродинний метод більш стійкий в роботі за наявності девіації (нестабільності) частоти вхідних сигналів, потребує менш жорстких вимог до характеристики керування гетеродина (в частині її лінійності, стабільності в часі і при впливі температурних факторів).

3. Для оброблення радіоімпульсів більш придатний гетеродинний метод, який здатний обробляти навіть поодинокі радіоімпульси.

Література

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб.пособие для вузов.// М.; Радио и связь. 1994. 458 с.

2. Мирских Г.А., Цыпкун Л.Г. Метод расширения динамического диаапазона широкополосных гетеродинных преобразователей частоты.// Техника средств связи. Серия – Радиоизмерительная техника. Вып. 5, 1985, с.25-29.

<p>Мирских Г.А., Могильный С.Б. Алгоритмы управления широкополосными преобразователями частоты. Рассмотрены методы широкодиапазонного поиска и преобразования частоты непрерывных и импульсно-модулированных сигналов. Предложены алгоритмы управления узлами преобразователя, которые позволяют достичь однозначности результата при минимальных аппаратурных затратах.</p>	<p>Mirskykh G.A., Mogylniy S.B. Algorithm of the tuning by the wideband transforms of the frequency Methods of the wideband search and transformation of the frequency continuous and pulse-modulated signals are described. It suggested algorithms tuning by circuits of the transforms, which allows reaching of the simple result with the minimum apparatus expenditures.</p>
---	---

Надійшла до редакції 27 травня 2006 року