

Н. П. ВОЛЛЕРНЕР

ПЕРЕТВОРЕННЯ СПЕКТРІВ У РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

1. Перетворення спектрів сигналів і перешкод, що широко застосовується в радіоелектронній апаратурі, можливе в нелінійних або параметричних (лінійних із змінними параметрами) системах. Для вузькосмугових процесів ($F/f \ll 1$, де F — ширина спектра, а f — середня частота), крім перетворення спектра процесу, становить інтерес перетворення спектра обвідної.

Лінійним апаратурним перетворенням спектрів назвемо таке, за якого можна застосувати принцип суперпозиції до процесу або його обвідної. При нелінійних перетвореннях спектрів принцип суперпозиції застосувати неможливо: змінюється форма сигналів, їх обвідних і спектрів. Нелінійні перетворення застосовують лише у випадку перетворення сигналів простої форми, наприклад прямокутних радіоімпульсів.

Розглянемо деякі особливості лінійного перетворення спектрів обвідних вузькосмугових процесів.

До лінійних перетворень спектрів можна віднести:

а) перенесення спектра (гетеродинування) — зсув усіх компонент спектра $\overline{S(\omega)}$, що перетворюється, на однакову величину $\pm \Omega$ вздовж осі частот

$$\overline{F(\omega)} = \overline{S(\omega) \pm \Omega},$$

де $\overline{F(\omega)}$ — тут і нижче перетворений спектр;

б) транспонування — помноження частоти всіх складових спектра $\overline{S(\omega)}$, що перетворюється, на однакову величину $k \neq 1$

$$\overline{F(\omega)} = \overline{S(k\omega)};$$

в) резонансне помноження частоти [1], яке застосовується головним чином до вузькосмугових процесів типу $u(t) = \overline{U(t)} \sin(\omega t + \psi)$, де $\overline{U(t)}$ — повільно порівняно з $\sin \omega t$ змінювана функція. Якщо

режим резонансного помноження частоти обрано правильно, середня частота процесу збільшується в m разів, а форма обвідної (її спектра) не змінюється

$$f(t) = \overline{U(t)} \sin [m(\omega t + \psi)],$$

де $f(t)$ — перетворений процес.

2. Перенесення спектра здійснюється у перетворювачах частоти, що являють собою комбінацію нелінійних або лінійних зі змінними параметрами елементів, фільтрів і гетеродина — допоміжного генератора періодичних або гармонійних коливань. Для технічно неспотвореного перенесення спектра вздовж осі частот між частотами перетворюваного спектра і гетеродина, який визначає зсув спектра, необхідно одержувати певні співвідношення [2], а фільтри повинні мати високу вибірність.

Транспонування спектра можна здійснити, застосовуючи запис і відтворення процесів на швидкостях, що відрізняються, в рециркуляторах [3] і т. д.

Резонансне помноження частоти вузькосмугового процесу здійснюється комбінуванням нелінійного елемента (лінійного по обвідній) і селективного фільтра з середньою частотою, що дорівнює заданій гармоніці середньої частоти перетворюваного процесу, і смугою порядку ширини спектра його обвідної. Наприклад, у пристроях з уніполярною лінійною характеристикою нелінійного елемента при 90° відсічці коливань можна фільтрами виділити парні гармоніки без спотворення форми обвідної.

Порівняємо характерні особливості розглянутих методів перетворення спектрів.

3. При перенесенні спектра масштаб часу проходження процесу, а отже, і його обвідної не змінюється. Перенесення спектра може здійснюватися в реальному масштабі часу, при цьому перетворений сигнал надходить на вхід перетворювача безпосередньо, без істотної затримки в часі.

При транспонуванні добуток ширини частотного спектра процесу на його тривалість не змінюється; отже, змінюється тривалість процесу та його обвідної, тому реальний масштаб часу принципово не можливий і повинна бути затримка в часі між перетвореним і перетвореним сигналами. Це викликає необхідність застосування при транспонуванні пристроїв пам'яті.

При резонансному помноженні частоти масштаб часу обвідної процесу не змінюється, тому таке перетворення процесу можливе в реальному масштабі часу.

4. Порівняємо час, потрібний для апаратного спектрального аналізу процесів при розглядуваних методах перетворення спектрів, вважаючи роздільну здатність аналізу для вихідного процесу незмінною.

Мінімальний ¹ час аналізу T_{\min} в основному визначається потрібною роздільною здатністю — абсолютною величиною інтервалу між розділюваними компонентами, яка приблизно дорівнює смузі пропускання фільтра аналізатора ΔF . Для послідовного способу час аналізу пропорціональний і ширині спектра F , що аналізується

$$T_{\min} \equiv F/\Delta F^2 \text{ — при послідовному способі аналізу;}$$

$$T_{\min} \equiv 1/\Delta F \text{ — при паралельному способі аналізу.}$$

При перенесенні спектра і резонансному помноженні частоти сигналу з моночастотним заповненням взаємне розташування компонент спектра не змінюється, бо відбувається однакове зміщення усіх компонент спектра по осі частот; таким чином, потрібна смуга пропускання фільтрів аналізаторів і ширина аналізованого спектра не змінюються, отже, не змінюється мінімальний час аналізу.

При транспонуванні ширина аналізованого спектра збільшується у k разів, але при заданій роздільній здатності аналізу вихідного процесу роздільна здатність (смуга фільтра аналізатора) транспонованого спектра також збільшується у k разів, тому в цілому час аналізу зменшується в k разів. Ця чудова властивість транспонування дозволяє застосовувати послідовний аналіз і тоді, коли спектральний аналіз треба виконувати в реальному масштабі часу. Для цього достатньо обрати коефіцієнт транспонування $k \geq F/\Delta F$. В дійсності виконати аналіз у реальному масштабі часу не вдається, бо неминуча деяка, в ряді випадків припустима, затримка в часі, викликана недостатньою швидкістю комутуючих пристроїв.

Таким чином, транспонування спектра дозволяє звести час послідовного аналізу до часу паралельного аналізу.

Якщо обрати $k < 1$, то час аналізу зростає, при цьому зменшиться швидкість процесу та його обвідної, що може становити інтерес, наприклад, під час науково-дослідної роботи, коли потрібно фіксувати процеси за допомогою записуючих пристроїв з обмеженою швидкістю.

5. Порівняємо розділення по частоті сигналів з перетвореними спектрами.

У діапазоні високих частот перенесення спектра вниз по частоті спрощує техніку створення фільтрів, оскільки збільшена відносна зміна частоти $\Delta F/f$ дозволяє застосовувати контури з меншою добротністю і знижує вимоги до їх еталонних властивостей — стабільності частот настрійки. Принципово перенесення спектра роздільну

¹ Розглядається мінімальний час аналізу регулярних процесів. Для випадкових процесів мінімальний час аналізу набагато більший і визначається припустимою похибкою (дисперсією) результатів вимірювань.

здатність не змінює; і якщо потрібно розділити радіосигнали із значно перекриваними спектрами, перенесення спектра не допомагає. Це пояснюється тим, що при поданні різних сигналів з однаковою енергією на вхід фільтра навіть з доброю прямокутністю енергія на його виході змінюється незначно, якщо спектри помітно перешаковують.

Резонансне помноження частоти підвищує роздільну здатність сигналів, не модульованих по фазі або частоті, оскільки ширина обвідної сигналу не змінюється, а частота збільшується в m разів. Наприклад, при різниці середніх частот двох вихідних сигналів $f_2 - f_1 \ll F$ (де F — ширина спектра обвідної) після помноження у достатнє число разів різниця частот може стати більшою, ніж ширина спектра $m(f_2 - f_1) \gg F$, і після помноження ці сигнали можуть бути розділені. Щоб спростити створення фільтрів, після помноження частоти доцільно застосувати перенесення спектра вниз по частоті для збільшення відношення F/f .

Транспонування спектра принципово не змінює роздільну здатність, оскільки в однакове число разів змінюється ширина спектра і різниця середніх частот. Транспонування з наступним перенесенням спектра у ряді випадків виправдане, наприклад при спектральному аналізі з високою роздільною здатністю, оскільки транспонування скорочує час аналізу, а перенесення спектра спрощує техніку створення фільтрів. Додатковою перевагою транспонування при аналізі в діапазоні інфразвукових частот є спрощення виготовлення фільтрів на більш високій транспонованій частоті — менші габарити індуктивностей і конденсаторів.

6. Розглянемо, нарешті, фазові співвідношення при перетворенні спектрів.

Перенесення спектра не змінює початкової фази складових, тому для фазових вимірювань перенесення спектра не дає принципів поліпшень. Технічно апаратура спрощується, оскільки фазовимірювач може працювати на фіксованій частоті (проміжній частоті супергетеродинного обладнання).

Транспонування частоти також не змінює початкової фази складових спектра, тому принципів поліпшень для фазових вимірювань не дає. Технічно транспонування можна застосовувати при вимірюванні зсувів фаз вимірювачами зсувів фаз, призначеними для одного діапазону частот, в іншому діапазоні частот або для прискорення (уповільнення) аналізу.

Резонансне помноження частоти принципово дозволяє підвищити точність фазових вимірювачів, оскільки при помноженні частоти в m разів у m разів збільшуються зсуви фази. Це значно підвищує чутливість (по куту) вимірювачів зсувів фаз. Технічно резонансне помноження частоти доцільно сполучати з наступним перенесенням спектра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Жаботинский М. К. и Свердлов Ю. Л. Основы теории и техники умножения частоты. «Советское радио», 1964.
2. Жлобинский И. М., Содин Л. Г. Методы расчета и устранения комбинационных помех, возникающих при преобразовании частоты.— «Радиотехника», 1958, № 12.
3. Новые методы спектрального анализа сигналов.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 8.

Н. Ф. ВОЛЛЕРНЕР

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Сравниваются особенности и технические характеристики некоторых методов преобразования спектров.

N. F. VOLLERNER

SPECTRA TRANSFORMATION IN RADIOELECTRONIC DEVICES

S u m m a r y

Peculiarities and technical characteristics of some methods of spectra transformation are compared.