

О. І. ХОРУНЖИЙ

ІДЕАЛЬНИЙ СМУГОВИЙ ОБМЕЖУВАЧ І ОПТИМАЛЬНЕ ФАЗОВЕ ВИЯВЛЕННЯ

Найкращим засобом до виявлення сигналу на фоні шумів є оптимальна амплітудно-фазова обробка. Її практичне втілення утруднене тим, що звичайно сигнал має невідомі параметри. Тому часто обмежуються оптимальною амплітудною, а інколи — фазовою обробкою, що набуває широкого застосування як метод боротьби з нестационарними за інтенсивністю перешкодами. В [1], [3] показано, що при великих значеннях відношення с/ш (сигнал/шум) до оптимальної краще наближається амплітудна обробка, а при малих с/ш — близька до неї фазова (інформація про сигнал переходить у фазу). Зіставлення виконували таким чином. Одержано вирази імовірності помилкової тривоги $P_{пт}$ та правильного виявлення $P_{пв}$ для оптимальної амплітудно-фазової, амплітудної та фазової обробки, які включають вхідні с/ш. Останні порівнюються при постійних величинах $P_{пт}$ та $P_{пв}$. В [1] наводиться блок-схема оптимального фазового виявлення, яка для гармонічного сигналу постійної амплітуди з невідомою початковою фазою складається з узгодженого із сигналом фільтра, що виконує роль фазового детектора та інтегратора, і детектора обвідної та порогового порівнювача. При аналізі виходять з умови, що розподіл імовірностей напруги на виході інтегратора на закінчення інтегрування нормальний, тому його результати придатні, якщо інтегрується велика кількість виборок напруги, відповідних до незалежних значень фази.

Щоб перейти до фазового виявлення, треба зруйнувати інформацію про амплітуду вхідної напруги, зберігши інформацію про фазу. Цю операцію може виконувати ідеальний обмежувач, що дозволяє фіксувати моменти переходу напруги через нуль. Він має характеристику

$$U_{обм} = \begin{cases} U_0 & U_{вх} > 0; \\ 0 & U_{вх} = 0; \\ -U_0 & U_{вх} < 0. \end{cases}$$

Це — типово нелінійний пристрій, і аналіз його роботи складний. Дослідженню роботи обмежувача присвячено багато праць, що відрізняються розглядом різних видів вхідних діянь та використовуваним математичним апаратом. Результатом таких досліджень є головним чином одержання відношення с/ш на виході, а також визначення кореляційних функцій і відповідних спектрів. Це відношення одержують або безпосередньо, приймаючи деякі обмеження щодо вхідних діянь (наприклад, в [10], [13]), або за допомогою попередньо визначених кореляційних функцій і одержаних з них спектрів (роботи [4], [5], [11]).

Найбільш повний опис системи дає розподіл імовірностей процесу на виході або вирази для $P_{пт}$ та $P_{пв}$, як в [7], [8]. Більш простою, хоч і неповною енергетичною оцінкою якості системи є відношення с/ш, що не враховує правила прийняття розв'язку (критерію) на виході. Крім того, можливі різні визначення вихідного с/ш, тому що система нелінійна і утворюються продукти перехресної модуляції с × ш. В [15] зроблено спробу ввести універсальний метод визначення с/ш, оснований на кореляційному способі виділення сигналу з шумів.

Класифікація методів аналізу перетворення випадкових процесів, що проходять крізь нелінійні системи, наведена в [2], де розглядаються кореляційна функція і спектр випадкового процесу на виході нелінійної системи. Відрізняють: 1) прямий метод (кореляцій); 2) метод контурних інтегралів (характеристичних функцій, Райса); 3) метод обвідної (Бунімовича) [17].

В окремих випадках можна одержувати кореляційну функцію і спектр на виході нелінійного пристрою більш простими засобами [11]. Так, у [13] використовується розкладання в ряд Фур'є нелінійної характеристики при великих с/ш; подібний метод застосовано в [14], щоб одержати вихідне с/ш.

Однією з перших робіт у дослідженні обмежувача була [5], результати якої були використані автором у наступній [11]. Діяння — вузькосмуговий нормальний шум і гармонічний сигнал із середньою частотою шуму, система — смуговий обмежувач (ідеальний обмежувач із смуговим фільтром, що пропускає всі складові вихідного спектра біля першої гармоніки). Мета роботи — одержати автокореляційну функцію та виражене через вхідне с/ш відношення потужностей с/ш на виході. Для малих вхідних с/ш $(с/ш)_{вх} \approx \frac{\pi}{4} (с/ш)_{вх}$, для великих — $(с/ш)_{вх} = 2 (с/ш)_{вх}$. Втрати при малих сигналах збігаються з вказаними в [1]. У [11] детально розглянуто смуговий обмежувач, що вузькосмуговий процес $x = E(t) \cos [\omega t + \varphi(t)]$, де $E(t)$ — обвідна, а $\varphi(t)$ — фаза процесу, перетворює в $y = \frac{2U_0}{\pi} \cos [\omega t + \varphi(t)]$, руйнуючи таким чином амплітудну і зберігаючи фазову інформацію. Там же одержано вираз кореляційної функції вихідного процесу, коли на вхід подано два гармонічних

сигнали з близькими частотами і незалежними випадковими початковими фазами.

У роботі [10] методом обвідної одержано вихідне відношення с/ш в залежності від вхідного для гармонічного сигналу і вузькосмугового шуму, що діють на нелінійний пристрій (в тому числі на обмежувач). Цю залежність одержано в компактному і загальному вигляді; це дає можливість простежити зв'язок вихідного с/ш з номером гармоніки, на яку настроєно фільтр обмежувача, та з виглядом нелінійної характеристики. При цьому виявляється, що для першої гармоніки вихідне с/ш обмежувача максимальне і збігається з одержаним в інших роботах. Форма виразів дозволяє проаналізувати їх в залежності від тривалості спостереження.

Великий інтерес являє робота [7], яка дає більш повну оцінку смугового обмежувача, що входить до складу широкозастосовуваної системи. На вході смугового обмежувача є імпульсний сигнал тривалістю T , нормальний шум у смузі ΔF , причому с/ш по потужності на вході менше 0,5. Фільтр на виході обмежувача узгоджений з сигналом, його смуга $\Delta f = 1/T (\Delta f \ll \Delta F)$. Розглянуто випадки з сигналами, що відомі повністю, а також з невідомими параметрами. Автор використовує результати своєї роботи [6] і одержує

$$(с/ш)_{\text{вих}} \cong \frac{\pi}{4} \left(\frac{2E}{N_0} \right),$$

де E — енергія сигналу, N_0 — спектральна густина шуму, що збігається з результатами інших робіт. Показано також, що від введення обмежувача точність вимірювання частоти несучої та часу запізнення сигналу зменшується лише на 10%, а роздільна здатність приймача не змінюється.

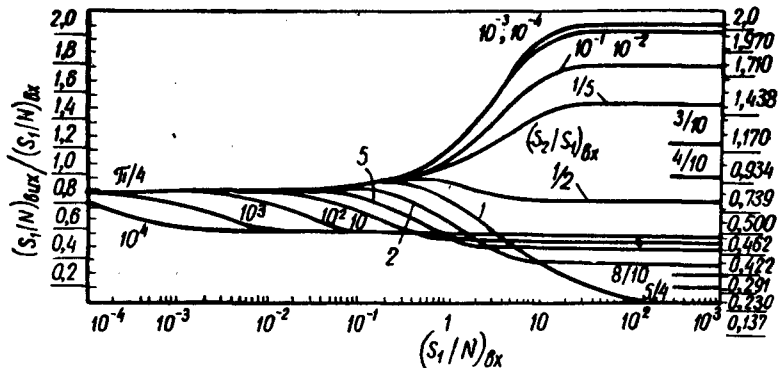
Подібний випадок розглянутий у роботі [8], де також досліджується широкосмуговий обмежувач при $\Delta f \ll \Delta F$. Показано, що в реальних умовах втрати від обмеження незначні. Результати робіт [9], [14] також дають величину втрат для малих с/ш приблизно 0,6 дб.

У [14] вхідне діяння зображене у вигляді суми гармонічних сигналів різної амплітуди з близькими частотами; розв'язання виконане на основі простих фізичних уявлень. Показано, що сильний сигнал удвічі подавляє слабший в порівнянні зі входом, фазові співвідношення зберігаються. Розглянуто також нормальний шум з постійною складовою.

Велике значення для практичного застосування має робота [12]. На вхід смугового обмежувача діють два синусоїдних сигнали близьких частот на фоні вузькосмугового нормального шуму. Аналіз проведено, як в [5], за допомогою визначення автокореляційної функції на виході. Результати одержано в загальному вигляді; вони містять як окремі випадки висновки інших робіт. Так, одержана залежність вихідного с/ш від вхідного при різних співвідношеннях сигналів дозволяє зробити такі висновки: при великих вхідних с/ш і малому

другому сигналі вихідне с/ш дорівнює подвійному вхідному; при великих с/ш і с/с великий сигнал подавляє менший майже вдвічі; при малих с/ш амплітудні співвідношення сигналів зберігаються (див. рисунок).

У роботі також зазначено, що відношення с/ш не може характеризувати обмежувач при виявленні сигналу і застосовне лише при вимірюванні параметрів сигналу або оцінці правильності передачі. Застосування обмежувача завжди призводить до програшу у виявленні, це пов'язане з тим, що виникнення сигналу зменшує рівень



Нормоване відношення сигнал/шум на виході ідеального смугового обмежувача як функція відношення сигнал/шум на вході:

$(S_2/S_1)_{\text{вх}}$ — відношення сигналів на вході по потужності.

шуму (сумарна потужність біля першої гармоніки зберігається). Такий факт притаманний нелінійній системі, він не дозволяє встановити незмінний оптимальний поріг для прийняття рішення. При малих сигналах рівень перешкод майже не змінюється, що дозволяє використовувати для виявлення результати [7].

На користь застосування обмежувача служить його стійкість до нестационарних і особливо імпульсних перешкод, що зазначено в роботах [7], [14], [16]; він дозволяє підтримувати незмінним рівень помилкових тривог при змінній інтенсивності перешкод і постійному порозі. Крім того, результати роботи системи не залежать при цьому від змін підсилення каскадів до обмежувача.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левин Б. Р., Оптимальные фазовые методы обнаружения сигналов, Радиотехника и электроника, 1960, № 4.
2. Левин Б. Р., Теория случайных процессов и ее применения в радиотехнике, «Советское радио», 1957.
3. Гуткин Л. С., Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах, Госэнергоиздат, 1961.
4. Миддлтон Д., Введение в статистическую теорию связи, «Советское радио», 1961.

5. Davenport W. B., Signal-to-Noise Ratios in Band-pass Limiters, J. Appl. Physics, 24, № 6, 1953.
6. Черняк Ю. Б., О линейных свойствах системы широкополосный ограничитель-фильтр, Радиотехника и электроника, 1962, № 7.
7. Черняк Ю. Б., Чувствительность, точность и разрешающая способность многоканального приемника с широкополосным ограничителем, Радиотехника и электроника, 1962, № 8.
8. Bello P., Higgins W., Effect of Hard-Limiting on the Probabilities of incorrect dismissal and false alarm at the output of envelope detector, IRE Trans, № 2, 1961, IT-7.
9. Manasse R., Price R., Lerner R., Loss of signal detectability in band-pass Limiter, IRE Trans., March, 1958, IT-4.
10. Blashman N. M., The output Signal-to-Noise Ratio of a Power-law Detector, J. Appl. Physics, 24, № 6, 1953.
11. Давенпорт В. Б., Рут В. Л., Введение в теорию случайных сигналов и шумов, ИЛ, 1960.
12. Jones J. J., Hard Limiting of Two signals in Random Noise, IEEE Trans., № 1, 1963, IT-9.
13. Tucker J. D., Linear Rectifiers and Limiters, Wireless Engr., № 29, 1952.
14. Кэн, Об отношении с/ш в полосовых ограничителях, Зарубежная радиоэлектроника, 1961, № 8.
15. Цалкин И. А., Об определении отношения с/ш в нелинейных системах. Вопросы радиоэлектроники, сер. XII, вып. 28, 1964.
16. Thomas, Williams, On the detection of signals in Nonstationary Noise by Product arrays, JASA, № 4, 1959.
17. Бунимович В. И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах, «Советское радио», 1951.

A. I. HORUNJY

IDEAL BAND-PASS LIMITER AND OPTIMUM PHASE DETECTION

S u m m a r y

In this work literature review has been made on questions of limiters analysis and application for the optimum phase detection. The works have been reviewed are devoted to investigations of different input effects and limiters mathematical analysis methods. Shown in many works limiting loss value in signal detection among stationary noise (approximately 1db) is correct for small signals [7] or for signal parameters measuring [12].