Приймання та оброблення сигналів і зображень

Радіозавади: типи, характеристики

Визначення, класифікація радіозавад

Радіозавади – електромагнітні коливання у колах приймача, які заважають відновленню повідомлення з прийнятого сигналу.

Класифікують радіозавади за такими ознаками:

- **за місцем виникнення**: ***внутрішні*** (виникають у колах приймача); ***зовнішні*** (приймаються антеною);
- **за взаємодією з корисним сигналом**: ***адитивні*** (складаються з корисним сигналом); ***мультиплікативні*** (множаться на сигнал, тобто змінюють його параметри);
- **за характером впливу на приймач та його функціональні вузли**: ***шумові; імпульсні; проміжні (квазіімпульсні); сторонні сигнали***;

Зверніть увагу: шумові завади часто називають “шум”, а імпульсні та квазіімпульсні – завадами.

- **за причинами, які обумовлюють виникнення завад**:

  А – випадковий характер теплового руху заряджених частинок (***тепловий шум***);

Визначення, класифікація радіозавад

Б – квантова природа випромінювання (***квантовий шум***);

В – процеси у космосі (***космічні завади***);

Г – електричні процеси в атмосфері: ***атмосферні завади*** (створюються грозовими розрядами); ***хуртовинні завади*** (електризація антен зарядженими частинками сухого снігу, піску тощо);

Д – поглинання електромагнітних хвиль в атмосфері;

Е – електричні процеси, пов'язані з промисловою, побутовою та іншою діяльністю людини (***індустріальні завади***);

Ж – робота радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв, які випромінюють електромагнітну енергію (зосереджені за спектром завади: ***міжсистемні*** (взаємний вплив різних систем); ***внутрішньосистемні*** (взаємний вплив різних пристроїв однієї системи); ***внутрішньооб'єктні*** (взаємний вплив систем і пристроїв, розташованих на одному кораблі, літаку тощо);

Визначення, класифікація радіозавад

З – розсіяння та відбиття місцевими предметами електромагнітної енергії випроміненої антеною передавача електромагнітної енергії, що суттєво впливає при суміщенні у просторі передавача та приймача, наприклад, у радіолокації);

К – швидкі випадкові зміни умов поширення електромагнітних хвиль;

Л – інтерференція променів при багатопроменевому поширенні.

Причому **завади типу Д, К, Л – мультиплікативні, решта – адитивні. За адитивних завад збільшення рівня сигналу збільшує співвідношення S/N на вході приймача, що покращує умови прийому. За мультиплікативних завад зміна рівня потужного сигналу слабко впливає на умови прийому.**

Характеристики радіозавад

Радіозавади типу А – Д, К, Л – природні, вони діють за об'єктивними законами, які не залежать від діяльності людини. Знаючи ці закони та характеристики завад, можна вибрати параметри технічних систем таки чином, щоб мінімізувати вплив цих завад. **Джерела завад Е – З – антропогенні, тобто створені людиною, причому або ненавмисно, або навмисно.** Зменшити вплив ненавмисних завад можна шляхом вибору параметрів приймача та удосконаленням пристроїв, які створюють завади.

Приклади того, **як проявляють себе завади:**

1) ***на екрані осцилографа:*** імпульсні – викидами різної інтенсивності та форми; шумові – викидами різної форми, висоти та тривалості, які йдуть неперервно; квазіімпульсні – серією викидів;

2) ***на виході телефонного приймача:*** імпульсні – окремими клацаннями; шумові – рівномірним шумом; квазіімпульсні – серією клацань, що перекриваються;

3) ***у телевізорах:*** імпульсні – окремими яскравими точками; шумові – розподілені по всьому екрану світними точками; квазіімпульсні – серією яскравих точок.

Характеристики радіозавад

Тепловий та квантовий шум. Природа завад такого типу приблизно однакова. З курсу фізики (закон Планка): будь-яке нагріте тіло ($T>0$) випромінює електромагнітну енергію – потік квантів енергії:

$$M_{\lambda,T}^{АЧТ} = \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right)-1}$$

$h = 6{,}624 \cdot 10^{-34}$ *Дж* $\cdot$ *с* - стала Планка;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-12}$ *Дж / град К* - стала Больцмана.

Флуктуації цих теплових випроміювань (відхилення миттєвих значень потужності випромінювання – кількість квантів – від середнього) створюють завади на радіо (до 3 ТГц) та оптичних (більших за 3 ТГц) частотах.

За температур, близьких до нормальних, потужність випромінювання дуже мала.

Характеристики радіозавад

На радіочастотах ($f<3$ ТГц і $hf<<kT$), розкладаючи у степеневий ряд вираз закону Планка та обмежуючись двома членами ряду, отримуємо:

$$\left[\exp\left(\frac{hf}{kT}\right)-1\right]^{-1} \approx hf/kT,$$

тобто **залишається той член ряду, який характеризує тепловий шум.**

На оптичних частотах $hf>>kT$, і

$$hf/kT >> 1,\ \left[\exp\left(\frac{hf}{kT}\right)-1\right]^{-1} \approx \exp\left(-hf/kT\right),$$

тобто **домінує квантовий шум нагрітого тіла.**

Квантовий шум випромінювання нагрітого тіла, як і випромінювана потужність, при $hf>>kT$ зі збільшенням частоти зменшується. Це визначає малий рівень власного шуму вхідних кіл приймачів оптичного діапазону.

Характеристики радіозавад

Але! За незмінної потужності сигналу на деякій його частоті $f_c >> kT/h$ кількість квантів енергії сигналу мала, і різко проявляється корпускулярна природа електромагнітних хвиль, що спричиняє суттєві флуктуації миттєвої кількості квантів сигналу і, відповідно, флуктуації потужності сигналу на вході оптичного приймача, які створюють на виході приймача заваду – шум. Ці флуктуації (шум на виході приймача) розглядають як ***результат впливу ефективного (еквівалентного) квантового шуму, який супроводжує сигнал. Називають його фотонним квантовим шумом.*** За відсутності сигналу відсутній і фотонний квантовий шум.

Фотонний квантовий шум принципово присутній при наявності сигналу, і він ***обмежує граничну (верхню) чутливість приймачів оптичного діапазону.*** На радіочастотах фотонний квантовий шум також присутній, проте він суттєво менший за тепловий ($hf<<kT$), оскільки кількість квантів енергії велика (при однаковій потужності сигналу), а їхня енергія мала. Числовою оцінкою, за якої вплив цих шумів змінюється протилежно, є частота

$$kT_н/h \approx \left[T_н = (25 \pm 10)^0\ C \approx 300\ K\right] \approx 6 \cdot 10^3\ \text{ГГц}.$$

Характеристики радіозавад

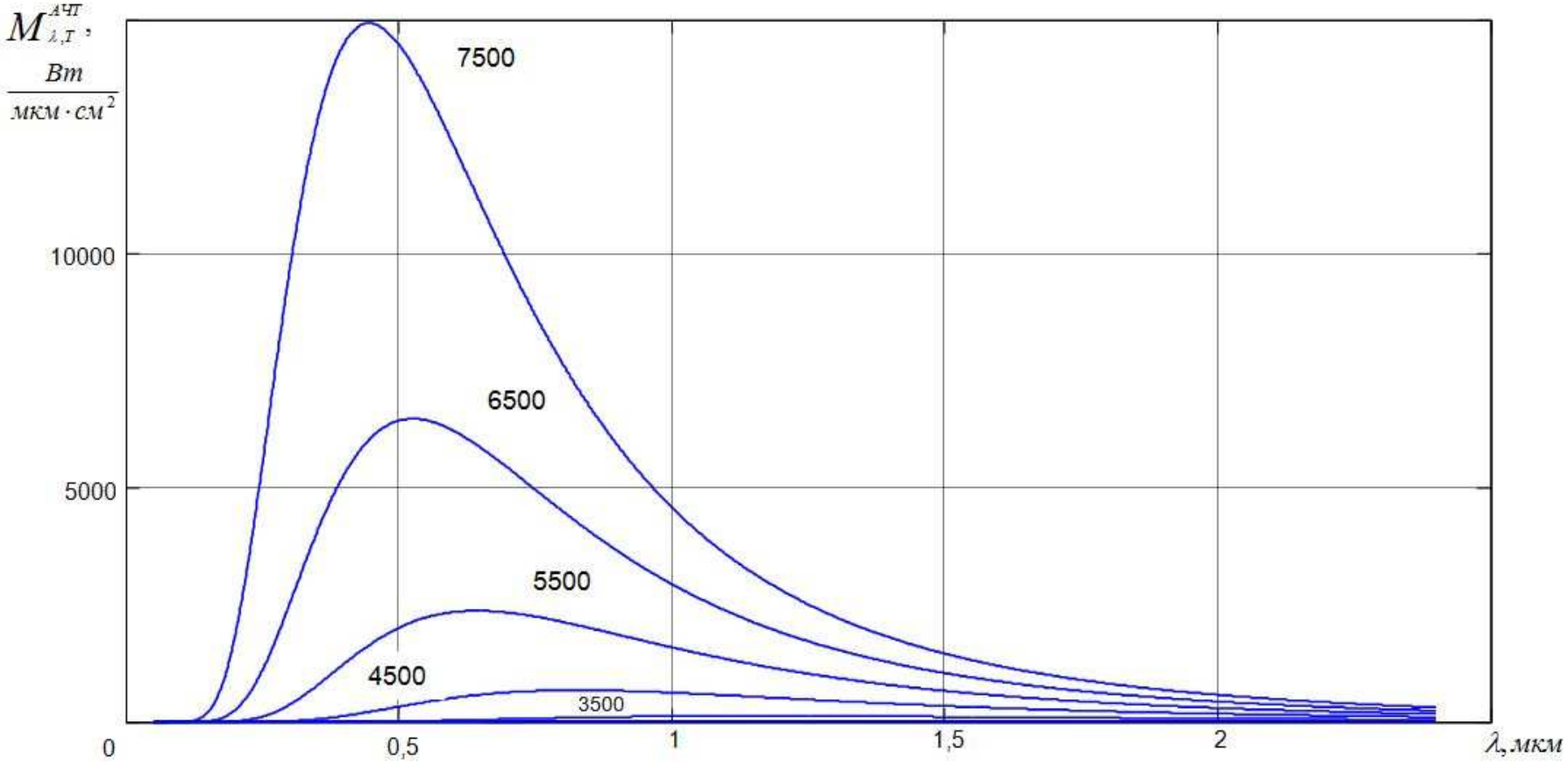
В оптичному діапазоні частот (інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове випромінювання) рівень квантового (фотонного) шуму різко збільшується порівняно з радіодіапазоном, і тим більше, чим більша частота випромінювання (рисунок на слайді 10).

Для видимого світла $hf/kT_н \approx 70...120$ Дж, тобто фотонний квантовий шум дає відношення S/N менше на 20 дБ, порівняно з тепловим на радіочастотах за однакової потужності сигналів.

Інтенсивності флуктуацій випромінювання та самого випромінювання, які створюють завади зв'язку в оптичному діапазоні частот, відчутні лише за високої, порядка тисяч кельвін, температурі джерела випромінювання, за якої максимум спектральної густини випромінювання зміщується до оптичних частот (рисунок на слайді 10).

Флуктуації випромінювання різних джерел, крім джерела сигналу, які сприймаються оптичними приймачами, та які створюють зовнішні завади в оптичному діапазоні частот, називають фоновим випромінюванням. Вони бувають малоінтенсивними розсіяними (розподіленими у просторі на небосхилі) і локальними, часто високоінтенсивними (випромінювання Сонця та зірок).

Характеристики радіозавад



Залежність спектральної густини енергетичної світності АЧТ від довжини хвилі та температури

Характеристики радіозавад

Атмосферні завади. Електричні імпульси різної полярності та форми, близької до експоненційної, прямокутної, сильно затухаючої синусоїди тощо, тривалістю від десятих долей до одиниць мілісекунд, та які виникають при грозових розрядах, створюють атмосферні завади. Спектр цих завад зменшується до високих частот, а зі збільшенням частоти збульшується затухання при поширенні радіохвиль, тому атмосферні завади суттєво впливають на прийом у діапазоні довжин хвиль, довших за декаметрові. При прийомі у діапазонах гекто- та кілометрових хвиль суттєво впливають завади електризації (хуртовинні завади).

Індустріальні завади. Ці завади виникають при різких змінах напруги чи струму в електричних колах. Основні джерела індустріальних радіозавад – електричний транспорт, високовольтні лінії електропередач, колекторні електродвигуни тощо. Створювані при різких змінах напруг (струму) радіочастотні компоненти поширюються лініями живлення електроенергією і, врезультаті випромінювання, або через ємнісні зв’язки, потрапляють у приймальну антену.

Характеристики радіозавад

У кожній країні встановлено жорсті норми на допустимі рівні індустріальних радіозавад, створюваних електричними пристроями.

Основними заходами для зниження рівня цих завад є придушення їх на місці виникнення фільтрами, які не пропускають радіочастотні компоненти завади від джерела у мережу живлення, замикаючи їх всередині джерела завад, а у найпростішому випадку – іскрогасильними колами. При цьому використовують спеціальні прохідні конденсатори з малою індуктивністю виводів та обкладинок.

Якщо пристрої створюють сильні завади, то екранують приміщення, в яких їх розташовано, а підведення електроживлення виконують через завадопридушуючі фільтри чи трансформатори з електростатичними екранами.

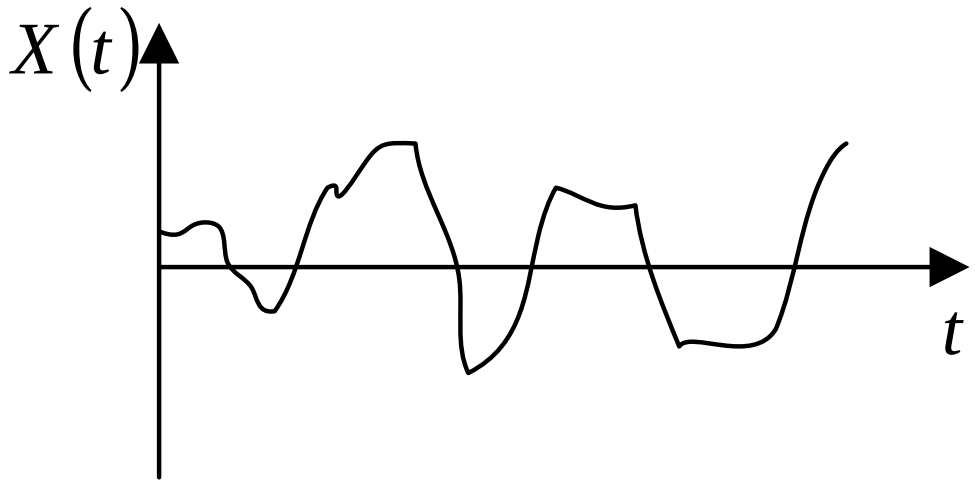
Зосереджені завади. Завади цього типу створюються радіотехнічними та телекомунікаційними пристроями. Зосереджені завади зменшують шляхом суворого обмеження позасмугових (непотрібних для передачі повідомлень) випромінювань передавальних пристроїв, зниження рівня випромінювання гетеродинів приймачів та інших пристроїв, які за функціональним призначенням не повинні випромінювати, а також завдяки правильній роботі радіослужб.

Характеристики випадкових сигналів (завад)

Загальна інформація

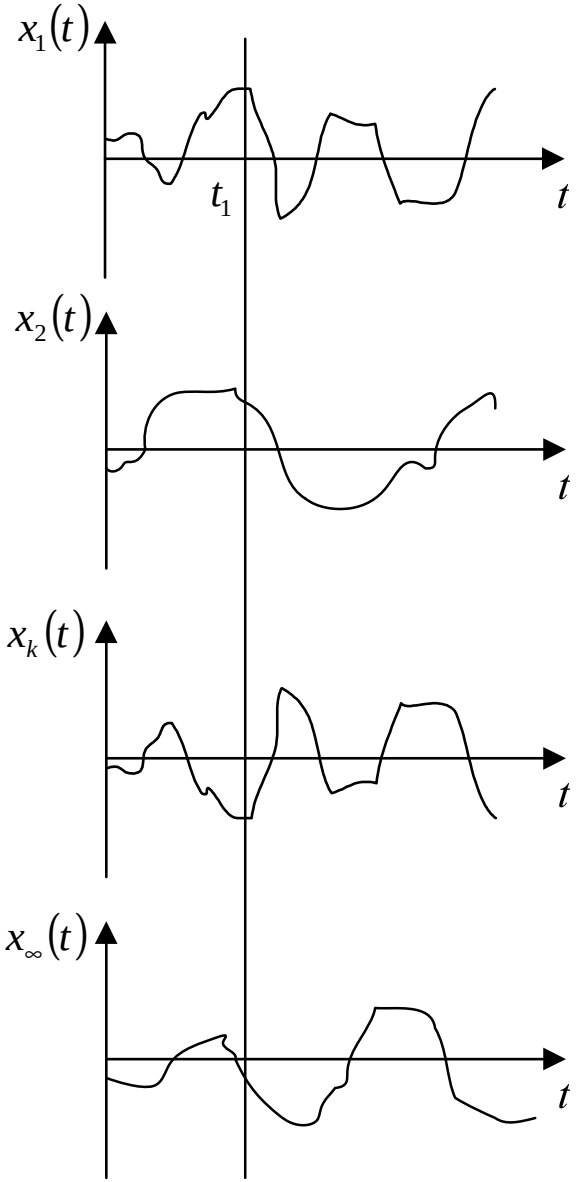
Випадковий процес *X(t)* – функція, яка у будь-який момент часу набуває значень, які є випадковими величинами.

Фіксуючи на певному часовому проміжку часу миттєві значення випадкового сигналу, отримують одну з реалізацій випадкового процесу – рисунок.



Реалізація випадкового процесу

Загальна інформація



$$\{x_1(t), x_2(t), ..., x_k(t), ..., x_\infty(t)\}$$

- статистичний ансамбль.

$$\{x_1(t_1), x_2(t_1), ..., x_k(t_2), ..., x_\infty(t_2)\}$$

- переріз статистичного ансамблю.

Статистичний ансамбль на його переріз

Основні параметри випадкового процесу

Математичне сподівання:

$$m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x;t) dx$$

$p(x;t)$ – одновимірна густина розподілу випадкового процесу.

Характеризує середнє значення процесу X(t) у поточний момент часу.

Дисперсія:

$$D_x(t) = M\left\{[x(t) - m_x(t)]^2\right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) - m_x(t)]^2 \, p(x;t) dx$$

Характеризує ступінь відхилення миттєвих значень, яких набувають окремі реалізації у фіксований момент часу, відносно середнього значення.

Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_x(t) = \sqrt{M\left\{[x(t) - m_x(t)]^2\right\}} = +\sqrt{D_x(t)}$$

Основні параметри випадкового процесу

Кореляційна функція (флуктуаційна складова випадкового процесу):

$$R_x(t_1,t_2)=M\{[x(t_1)-m_x(t_1)][x(t_2)-m_x(t_2)]\}=$$

$$=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}[x(t_1)-m_x(t_1)][x(t_2)-m_x(t_2)]p(x_1,x_2;t_1,t_2)dx_1dx_2$$

$p(x_1,x_2;t_1,t_2)-$ двовимірна густина розподілу $x(t_1)ma\ x(t_2).$

Характеризує ступінь статистичного зв'язку тих випадкових величин, які спостерігають у моменти часу $t_1\,ma\ t_2.$

При $t=t_1=t_2: R_x(t_1,t_2)=D_x(t)$

Основні параметри випадкового процесу

Коваріаційна функція:

$$K_x(t_1,t_2)=M[x(t_1)x(t_2)]=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t_1)x(t_2)p(x_1,x_2;t_1,t_2)dx_1dx_2$$

Характеризує статистичне усереднення добутку значень випадкового процесу X(t) у моменти часу t_1 *та* t_2.

Зв'язок між коваріаційною та кореляційною функціями:

$$R_x(t_1,t_2)=K_x(t_1,t_2)-m_x(t_1)m_x(t_2)$$

Стаціонарні випадкові процеси

До стаціонарних процесів належать процеси, у яких *n*-вимірна густина імовірності не залежить від моментів часу, а залежить тільки від часових інтервалів між цими моментами часу. Виконання цієї умови дає підстави вважати, що математичне сподівання, середній квадрат та дисперсія не залежать від часу, а кореляційна функція залежить не від самих моментів часу t_1 *та* t_2, а від інтервалу між ними $\tau = t_2 - t_1$.

Тому ***для стаціонарних випадкових процесів*** (в сенсі наведеного визначення) основні параметри можна записати так:

$$m_x = M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx, \qquad K_x(\tau) = M[x(t)x(t+\tau)],$$

$$R_x(\tau) = K_x(\tau) - m_x^2, \qquad D_x = K_x(0) - m_x^2 = R_x(0) = \sigma_x^2,$$

$$\sigma_x = \sqrt{K_x(0) - m_x^2}, \qquad R_x(\tau) = R_x(-\tau),$$

$r_x(\tau) = \dfrac{R_x(\tau)}{D_x}$ – нормована кореляційна функція.

Ергодичні випадкові процеси

Стаціонарний випадковий процес, називають **ергодичним**, якщо при визначенні будь-яких статистичних характеристик усереднення за множиною реалізацій еквівалентне усередненню за часом однієї теоретично нескінченної реалізації.

Умова ергодичності випадкового процесу містить умову його стаціонарності. Для ергодичних випадкових процесів основні параметри можна записати так:

$$m_x = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)dt \qquad K_x(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt$$

$$R_x(\tau) = K_x(\tau) - m_x^2 \qquad D_x = K_x(0) - m_x^2 = R_x(0) = \sigma_x^2$$

$$\sigma_x = \sqrt{K_x(0) - m_x^2}$$

Основні параметри випадкового процесу

Коваріаційна та кореляційна (у т.ч. нормована) функції характеризують зв'язок (кореляцію) між значеннями $x(t)$, розділеними проміжками часу τ. Чим повільніше, плавніше змінюється в часі $x(t)$, тим більший проміжок часу τ, у межах якого спостерігається статистичний зв'язок між миттєвими значеннями випадкової функції.

Приклади випадкових процесів:

1) гармонічне коливання з випадковою амплітудою – нестаціонарний та неергодичний випадковий процес.

2) гармонічне коливання з випадковою початковою фазою – стаціонарний та ергодичний випадковий процес.

3)) гармонічне коливання з випадковою амплітудою та початковою фазою – стаціонарний, але неергодичний випадковий процес (у різних реалізацій різна дисперсія).

Практичне використання отриманих результатів

Для описання властивотей процесу *x(t)* можна використати два простори:

1) часовий, використовуючи $p(x_1, x_2; t_1, t_2)$

2) частотний, використовуючи спектр потужності випадкового процесу.

Якщо під *x(t)* розуміти напругу або струм, то середній квадрат цієї функції можна розглядати як середню потужність, яка виділяється на опорі 1 Ом. Чому середній квадрат?

Якщо спектральну характеристику *к*-ї реалізації

$$\dot{X}_k(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_k(t) e^{-i\omega t} dt,\ k \in [1, 2, \ldots),$$

а потім усереднити $\dot{X}_k(\omega)$ по всіх функціях, то спектр процесу буде нульовим (за нульового математичного сподівання) в силу випадковості та незалежності складових у різних реалізаціях. Тому **введення поняття спектральної густини середнього квадрата випадкової функції є доцільним, адже значення середнього квадрата не залежить від співвідношення фаз гармонік, які складаються.**

Практичне використання отриманих результатів

Для цього виділимо з ансамблю будь-яку реалізацію $x_k(t)$, обмежимо її тривалість кінцевим інтервалом T, тоді $x_k(t) \leftrightarrow \dot{X}_k(\omega)$. Звідси енергія цього відрізка реалізації (за формулою Парсеваля):

$$E_{kT} = \int_{-T/2}^{T/2} x_k^2(t)dt = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \left|X_{kT}(\omega)\right|^2 d\omega$$

Середня потужність цієї k-ї реалізації на відрізкові T:

$$\overline{x_{kT}^2(t)} = \frac{E_{kT}}{T} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left|X_{kT}(\omega)\right|^2}{T} d\omega$$

При збільшенні тривалості відрізка T значення енергії E_{kT} також збільшується, проте співвідношення $\frac{E_{kT}}{T}$ прямує до деякої межі.

Спектральна густина середньої потужності

Тому

$$\overline{x_k^2(t)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\lim_{T\to\infty}\frac{\left|\dot{X}_{kT}(\omega)\right|^2}{T}d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}W_k(\omega)d\omega,$$

де

$$W_k(\omega) = \lim_{T\to\infty}\frac{\left|\dot{X}_{kT}(\omega)\right|^2}{T}$$

спектральна густина середньої потужності розглядуваної *к*-ї реалізації.

У загальному випадку $W_k(\omega)$ потрібно усереднити по множині реалізацій. Для стаціонарного та ергодичного процесу можна вважати, що знайдена шляхом усереднення по одній реалізації функція $W(\omega)$ характеризує весь процес в цілому, тому індекс *к* можна опустити.

Спектральна густина середньої потужності

Звідси остаточний вираз для середньої потужності:

$$\overline{x^2(t)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\omega)d\omega, \text{ де } W_x(\omega) = \lim_{T\to\infty}\frac{\left|\dot{X}_T(\omega)\right|^2}{T}.$$

Спектральна густина середньої потужності є парною та додатньою функцією, що випливає з її визначення.

Теорема Вінера-Хінчіна

Зміст теореми:

$$W_x(\omega) \leftrightarrow K_x(\tau),$$

або в розгорнутій формі :

$$W_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau,\ K_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega.$$

Для випадкових процесів з нульовим значенням математичного сподівання:

$$R_x(\tau) = K_x(\tau) - m_x^2 \Rightarrow \left.\begin{array}{c} K_x(\tau) = R_x(\tau) + m_x^2 \\ m_x = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow K_x(\tau) = R_x(\tau).$$

Звідси:

$$W_x(\omega) \leftrightarrow R_x(\tau),$$

або в розгорнутій формі :

$$W_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau,\ R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega.$$

Теорема Вінера-Хінчіна та білий шум

Фізичний зміст теореми: чим ширший спектр випадкового процесу, тим менший інтервал кореляції, і навпаки – чим більший інтервал кореляції, тим вужчий спектр процесу.

Білий шум (БШ):

$$W_x(\omega) = W_0 = const, \; -\infty < \omega < +\infty$$

Скориставшись теоремою Вінера-Хінчіна, для білого шуму маємо:

$$R_x(\tau) = \frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega\tau} d\omega = W_0 \delta(\tau),$$

Тобто:

$$R_x(\tau) = \begin{cases} \infty, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases}$$

Тобто цей шум має голкоподібну структуру з щільно розташованими, незкінченно тонкими випадковими викидами. Іноді його ще називають дельта-корельованим процесом. Дисперсія БШ нескінченно велика.

Проходження випадкого процесу через лінійне коло

Проходження випадкого процесу через лінійне коло

Задано: є лінійний чотириполюсник з відомим частотним коефіцієнтом передачі $\dot{K}(i\omega)$ (чи імпульсною характеристикою *h(t)*). Також відомі спектральна густина середньої потужності випадкового процесу $W_x(\omega)$ на вході цього чотириполюсника, його кореляційна функція $R_x(\tau)$ та дисперсія D_x

Знайти: $W_y(\omega)$, $R_y(\tau)$, D_y на виході цього чотириполюсника.

Розв'язок: є простим лише для нормального розподілу вхідного процесу

$$p(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

Тобто при будь-яких лінійних операціях з гаусівським процесом (підсилення, фільтрація, диференціювання, інтегрування тощо) розподіл залишається нормальним, змінюються лише функції $R(\tau)$, $W(\omega)$. Тому подальші результати наведено на випадок будь-якого розподілу, але стаціонарних процесів.

Проходження випадкого процесу через лінійне коло

Таким чином:

$$W_y(\omega) = K^2(\omega) W_x(\omega),$$

де $K^2(\omega) = \left|\dot{K}(i\omega)\right|^2 = K_p(\omega)$ – частотний коефіцієнт передачі за потужністю.

Кореляційна функція випадкового процесу на виході:

$$R_y(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} W_y(\tau) e^{-i\omega\tau} d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\tau) K_p(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega.$$

Дисперсія вихідного випадкового процесу (при $m_x = 0$):

$$D_y = R_y(0) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} W_y(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\tau) K_p(\omega) d\omega.$$