

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

БАРКОВ МИКОЛА ЮРІЙОВИЧ

Допускається до захисту:
Завідувач кафедри
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент
_____ Нескородева Т. В.
«__» _____ 20__р.

КОРЕЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОГРАМНОЇ МОДЕЛІ ШУМУ

Спеціальність 125 Кібербезпека
Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

Чернов Д. В.,
к.т.н., доцент кафедри
інформаційних технологій

(підпис)

Оцінка : _____ / _____ /

(бали/за шкалою ЕКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця 2021

АНОТАЦІЯ

Барков М. Ю. Кореляційні властивості програмної моделі шуму. Спеціальність 125 Кібербезпека. Донецький національний університет імені Василя Стуса. Вінниця. 2021 рік. У бакалаврській роботі було розглянуто математичні моделі каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом. На основі аналізу існуючих моделей було виявлено, що вони мають ряд обмежень, через що вони не можуть застосовуватися для вивчення ряду процесів, які відбуваються в каналах зв'язку. З огляду на результати проведеного аналізу було сформовано і обґрунтовано перелік вимог до бажаної математичної моделі. Також, був розроблений набір критеріїв для оцінки його потенційної математичної моделі, яка могла б відповідати описаним вимогам.

Ключові слова. Шум, аналіз.

Рис. 12, Бібліограф.: 27 найм

Barkov N. Y. Correlation properties of software model of noise. Specialty 125 Cybersecurity. Vasyl Stus Donetsk National University. Vinnitsa. 2021. In the bachelor's thesis, as a result of the analysis of existing mathematical models of communication channels with white Gaussian noise, it was concluded that these mathematical models have a number of limitations due to which they cannot be used to study a number of processes occurring in communication channels. . Taking into account the results of the analysis, a list of requirements for the desired mathematical model was formed and substantiated. Finally, a set of criteria was developed to evaluate its potential mathematical model, which could meet the described requirements.

Keywords. Noise, analysis.

Pic. 12, Bibliographer .: 27 items

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	6
1.1 Визначення флуктуації.	6
1.2 Шум та його природа.....	7
1.2.1 Захист від теплового шуму.....	8
1.3 Огляд доступних генераторів на базі ПК.....	9
РОЗДІЛ 2. ГЕНЕРАТОР ШУМУ ТА ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ.....	14
2.1 Генератор акустичного «білого» шуму.....	14
1.2.1 Аналоговий генератор шуму.....	15
1.2.2 Цифровий генератор шуму.....	17
1.2.3 Векторні генератори сигналів.....	19
1.2.4 Генератори сигналів довільної форми (ARB-генератори)... ..	21
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ШУМУ.....	24
3.2 Аналіз математичних моделей каналів зв'язку з білим гаусовим шумом.....	30
3.2.1 Аналіз існуючих математичних моделей каналів зв'язку з білим Гауссовим шумом.....	31
3.2.2 Розробка вимог до математичної моделі каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом.....	33
3.2.3 Розробка критеріїв адекватності математичної моделі.....	36

ВИСНОВОК	37
ДЖЕРЕЛА	38



ВСТУП

Актуальність. У сучасних умовах успішне функціонування і розвиток підприємств все більше залежать від забезпечення інформаційної безпеки. Перехід від індустріального суспільства до інформаційного сприяв тому, що інформація набула ваги головного ресурсу. Виробництво й обіг інформації стає однією з основних ланок розвитку економіки. Мало того, інформація, котра використовується у процесі діяльності підприємств і банків, є в основному їх інтелектуальна власність. Тому необхідність захисту інформації від зловмисників наразі дуже актуальна.

Метою роботи є аналіз математичних моделей каналів зв'язку з шумом

Завданням роботи є:

- аналіз математичних моделей каналів зв'язку з білим гаусовим шумом;
- проаналізувати, як працює генератор шуму, варіації створення генератора шуму, а також сфери його застосування;
- розробка програмної моделі шуму;

Були розглянуті існуючі математичні моделі каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом, їх переваги, недоліки та обмеження. На підставі проведеного аналізу обґрунтована необхідність розробки нової математичної моделі і сформовано перелік вимог, відповідність яким дозволило б виконувати якісно нові дослідження. Наведено розробку критеріїв оцінки адекватності математичної моделі.

Об'єктом дослідження є математична модель каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом.

Предметом дослідження є канали зв'язку з білим Гаусовим шумом.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Визначення флуктуації.

Фізичні величини, що характеризують макроскопічне тіло, яке знаходиться у стані рівноваги, практично завжди з великою точністю дорівнюють своїм середнім значенням. Але відхилення від середнього значення все ж таки мають місце, у зв'язку із чим виникає питання про знаходження розподілу ймовірностей цих відхилень.[1]

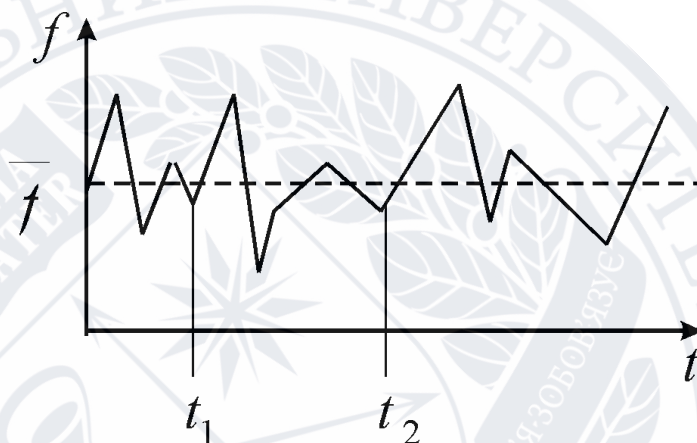


Рисунок 1

Коли ми з вами вводили поняття середніх величин ще на першій лекції, я малювала вам ось такий графік. Деяка фізична величина випадковим чином змінюється з часом. Доцільно ввести середнє значення як:

$$\bar{f} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$

Реальне значення величини f практично завжди відрізняється від \bar{f} . Такі випадкові відхилення фізичних величин від їх середніх значень і називаються флуктуаціями. [1]

Прикладів флуктуючих величин можна навести чимало, і не тільки у фізиці. Флуктує зріст людини, тривалість життя, густота населення у певній місцевості. З флуктуаціями пов'язані шумові характеристики приладів та розповсюдження радіохвиль.

1.2 Шум та його природа

Струм, що протікає через опір, лампу або транзистор, відчуває невеликі коливання навіть тоді, коли всі джерела ЕРС строго постійні. У деяких випадках це явище викликається зміною провідності між окремими точками опорів, в основному ж воно пов'язане зі статистичними характером руху носіїв струму. Коливання струму створюють на затискачах опорів, електродах ламп і транзисторів флуктуації напруги - шуми. До таких шумів відносяться теплової, дробовий, генераційно-рекомбінаційний і фліккер- шум.

Для будь-якої передачі даних справедливим є твердження, що отриманий сигнал складається з переданого сигналу, модифікованого різними спотвореннями, які вносяться самою системою передачі, а також з додаткових небажаних сигналів, що взаємодіють з вихідної хвилею під час її поширення від точки передачі до точки прийому. Ці небажані сигнали прийнято називати шумом. Шум є основним чинником, що обмежує продуктивність систем зв'язку.[2]

Шуми можна розділити на чотири категорії:

- тепловий шум;
- інтермодуляційні шуми;
- перехресні перешкоди;
- імпульсні перешкоди.

Розглянемо основні види шумів. "Джонсоновской шум" .Будь резистор на платі генерує на своїх висновках деяка напруга шуму, відоме як "шум Джонсона" (теплової шум) .У нього горизонтальний частотний спектр, т. Е. Однакова потужність шуму на всіх частотах (до певної межі) .Шум з горизонтальним спектром називають "білим шумом".[3]

Таким чином $U_{ш.эфф.}$ це те, що вийде на вході абсолютно безшумного фільтра з смугою пропускання B , якщо подати на його вхід напругу, породжену резистором при температурі T

При кімнатній температурі 293 К: $B / \text{Гц} = 1,27V / \text{Гц}$.

Шум Джонсона встановлює нижню межу напруги шумів будь-якого детектора, джерела сигналу або підсилювача, що має резистивні елементи. Активна складова повного опору джерела породжує шум Джонсона; так само діють резистори ланцюгів зсуву і навантаження підсилювача.

Тепловий шум - рівноважний шум, обумовлений тепловим рухом носіїв заряду в провіднику, в результаті чого на кінцях провідника виникає флуктууюча різниця потенціалів.

Спектральна щільність теплового шуму не залежить від частоти, тому його можна розглядати в широкому діапазоні частот як білий шум.[4]

1.2.1 Захист від теплового шуму

Активні технічні засоби захисту акустичного і віброакустичного каналу. Для активного захисту мовної інформації від не виявлених закладних пристроїв і знімання по інших каналах використовується апаратура активного захисту[5]:

- Технічні засоби просторового зашумлення;
- Пристрої віброакустичного захисту;
- Технічні засоби ультразвукового захисту.
- Технічні засоби просторового і лінійного зашумлення.
- Засоби створення акустичних маскуючих перешкод:
- генератори шуму в акустичному діапазоні;
- пристрої віброакустичного захисту;
- технічні засоби ультразвукового захисту приміщень;
- засоби створення електромагнітних маскуючих перешкод:
- технічні засоби просторового зашумлення;
- технічні засоби лінійного зашумлення, які у свою чергу діляться на засоби створення маскуючих перешкод в комунікаційних мережах і засоби створення маскуючих перешкод в мережах електроживлення;
- багатофункціональні засоби захисту.

1.3 Огляд доступних генераторів на базі ПК

Генератор імпульсів корисна річ в радіо практиці. Для тих, хто займається ремонтом і налаштуванням звуковий підсилювальної апаратури цей пристрій виявиться незамінним помічником у роботі, допоможе воно і при перевірці трактів радіоприймачів, магнітофонів та іншої техніки. Незайвим буде цей прилад і лабораторіях шкіл і ВУЗ'ов. Відмінний генератор в звуковому діапазоні може вийти з ПК, тут нічого навіть не доведеться вигадувати, як, наприклад у випадку з осцилографом або аналізатором, - всі компоненти виконують свої споконвічні функції. Сигнал знімається з виходу LINE-OUT або Speakers, за допомогою стандартного роз'єму, його амплітуда може досягати рівня 0,5 В. Звичайна звукова карта може генерувати сигнал з частотою до 22 кГц, вище - рідше, форма може бути будь-яка, була б програма, яка її ставить. Ось про ці-то програмах-генераторах ми зараз і поговоримо, все їх можна вільно скачати з Інтернету.

NCH Tone Generator - може бути встановлений під операційними системами Windows 3,1 / 95/98 / NT / 2000, його частотний діапазон в межах 1-20000 Гц. Програма має компактний інтерфейс (рис.11) і дає досить великий вибір у формі сигналів: синусоїдальний (sine), прямокутний (square), трикутний (triangle), пилоподібний (sawtooth), імпульсний і «білий шум» (white noise).

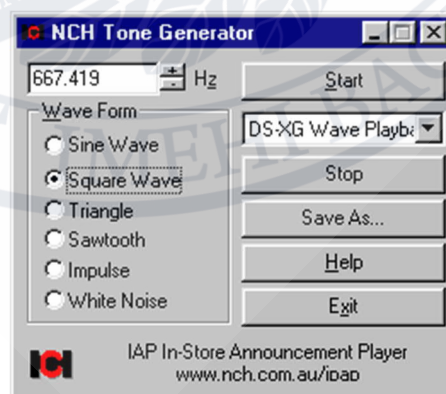


Рисунок 17. NCH Tone Generator

Сигнал можна зберегти у вигляді файлу, попередньо поставивши час звучання. До недоліків можна віднести відсутність на панелі програми регулятора ослаблення (амплітуди), передбачається, що в цій якості буде використовуватися стандартний мікшер Windows, що цілком прийнятно, але менш зручно. Так само не можна налаштовувати форму заданого сигналу, скажімо, по ск важливості, втім, як і з будь-яких інших параметрів.

Test Tone Generator - програма може використовуватися не тільки як генератор синусоїдального, прямокутного, трикутного сигналу заданої частоти і амплітуди, але також має розширені можливості - як генератор sweep-сигналу. Sweep-сигнал вдає із себе коливання з монотонно наростаючою частотою постійної амплітуди. Інтервал частот і період sweep-сигналу задається у відповідній вкладці, його також можна зробити періодично повторюється, включивши «Loop».

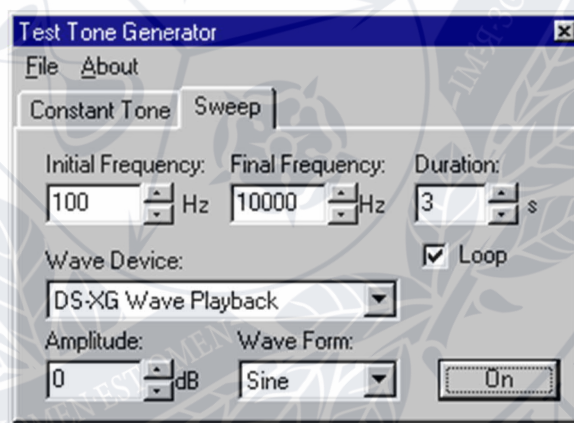


Рисунок 18. Test Tone Generator

На панелі програми знаходяться всі необхідні регулятори, правда, щонебудь налаштовувати в режимі відтворення сигналу не можна, генерація автоматично відключається. Частотний діапазон обмежений рівнем в 20000 Гц. Є можливість збереження в файл.

Generator Version 1.02 (beta 1) - відмітною особливістю цього генератора є можливість виробляти установки як частоти, так і амплітуди

незалежно для лівого і правого каналів. При необхідності один з каналів можна відключити.

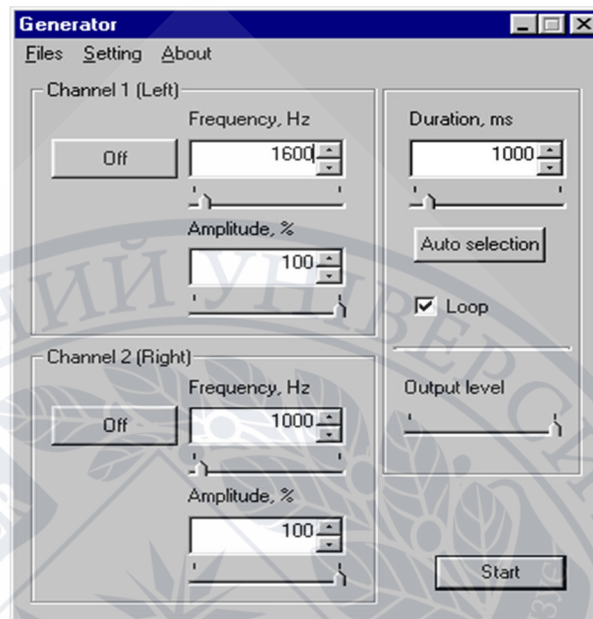


Рисунок 19. Generator Version 1.02 (beta 1)

У програмі начебто присутня можливість задавати тривалість сигналу в ms, проте у мене ця функція чомусь не працювала. Тому для нормальної роботи необхідно задати безперервний режим відтворення - «Loop». Верхній діапазон частот тут обмежений значенням 22050 Гц. Працює цей програмний генератор під ОС Windows 95/98.

Marchand Function Generator - генератор, що дозволяє формувати сигнал на обидва канали. Частота для обох виходів встановлюється одна і та ж, але для кожного каналу окремо можна задати форму сигналу: синусоїдальний, прямокутний, трикутний, імпульсний; а так же амплітуду. В іншому функціональність програми мінімальна. Верхня межа частоти - 20000 Гц.[17]

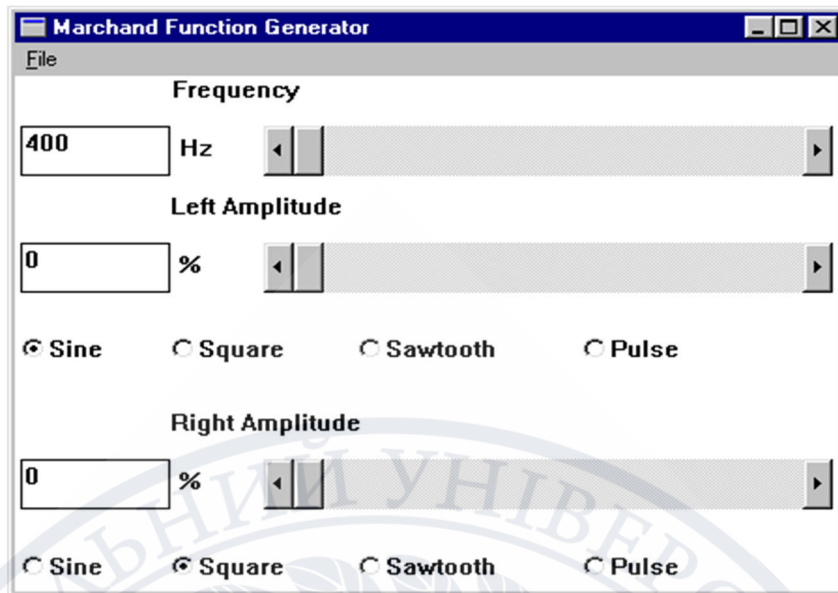


Рисунок 20. Marchand Function Generator

Sine Wave Generator 3.0 – програма-генератор з яскравим дизайном і верхнім рівнем частот в установках 40000 Гц. Сигнал формує тільки синусоїдальної форми. У великому вікні регулятори стилізовані під обертові движки потенціометрів. Є можливість задавати sweep-сигнал, правда тут задається тільки інтервал частот, час наростання завжди залишається фіксовано.

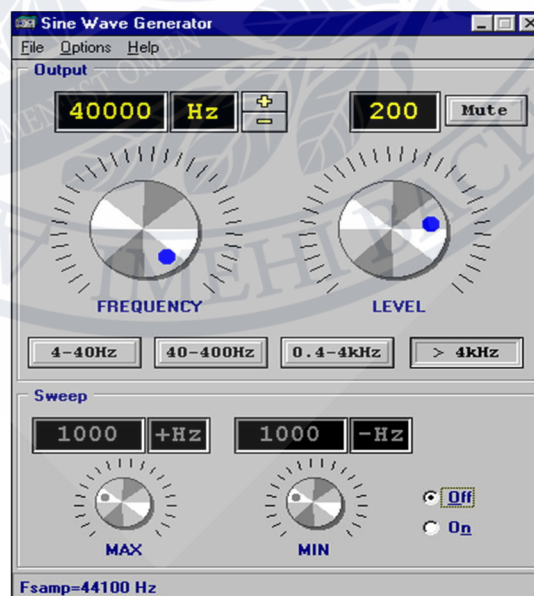


Рисунок 21. Sine Wave Generator 3.0

При використанні цього генератора у мене виникли сумніви щодо відповідності значень встановлених на табло частоти частоті реально виведеного сигналу, принаймні, в області ближче до низьких частот.

Що ж, не дивлячись на уявну простоту подібного забезпечення, практично жодна з представлених програм-генераторів не повторює іншу, кожна з них відрізняється якимись своїми особливостями. Не слід забувати, що це все-таки безкоштовне програмне забезпечення. У своєму різноманітті ці програми надають досить широкий вибір можливостей обмежених лише відносно невеликим частотним діапазоном звукової плати ПК.

Але існує один недолік, точніше застереження. Сучасні материнські плати в більшості своїй мають інтегрований звук і, відповідно, всі три звукові роз'єми на борту. Це реалізується шляхом установки окремої звукової мікросхеми, але частіше відразу на рівні чіпсета - головною мікросхеми материнської плати. Якість звуку при такій реалізації досить посереднє, тому користувачі все ж намагаються встановити на своїх ПК повноцінну звукову плату. У випадку з окремою звуковою платою можливі невдалі експерименти з подачею напруги на звуковий вхід, хіба мало що може трапитися, можуть закінчитися лише виходом зі строю щодо недорогого пристрою і втратою звуку в ПК. При аварійній ситуації з вбудованим на материнській платі звуком, ви ризикуєте зіпсувати найбільш дорогу і значущу частину комп'ютера.[18]

РОЗДІЛ 2. ГЕНЕРАТОР ШУМУ ТА ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ

2.1 Генератор акустичного «білого» шуму

Основний принцип радіоелектронної протидії - створення перешкод для приймального пристрою з інтенсивністю, достатньою для порушення його роботи.

Якщо заздалегідь невідома його робоча частота, то необхідно створити перешкоду по всьому можливому або доступному діапазону спектру. Досить універсальною перешкодою для зв'язкових радіоліній вважається шумовий сигнал. У зв'язку з цим апаратура радіопротидії повинна включати в свій склад генератор шуму достатньої потужності (на необхідний діапазон) і антенну систему. Практично при відношенні верхньої і нижньої частоти діапазону більш 2-х використовують декілька шумових генераторів і комбіновану багатодіапазонними антеною[6].

Генератори шуму в мовному діапазоні використовуються для захисту від несанкціонованого зйому акустичної інформації шляхом маскування безпосередньо корисного звукового сигналу. Маскування проводиться «білим» шумом з коригувати спектральної характеристикою.

Акустичні генератори шуму використовуються для зашумлення акустичного діапазону в приміщеннях і в лініях зв'язку, а також для оцінки акустичних властивостей приміщень. Під "шумом" у вузькому сенсі цього слова часто розуміють так званий білий шум, що характеризується тим, що його амплітудний спектр розподілений за нормальним законом, а спектральна щільність потужності постійна для всіх частот. У більш широкому сенсі під шумом, по асоціації з акустикою, розуміють перешкоди, що представляють собою суміш випадкових і короткочасних періодичних процесів. Крім білого шуму виділяють такі різновиди шуму, як мерехтіння шум і імпульсний шум. В генераторах шуму використовується білий шум, так як навіть сучасні ми способами обробки сигналів цей шум погано фільтрується.[7]

1.2.1 Аналоговий генератор шуму

Найпростішим методом отримання білого шуму є використання шумливих електронних елементів (ламп, транзисторів, різних діодів) з посиленням напруги шуму.

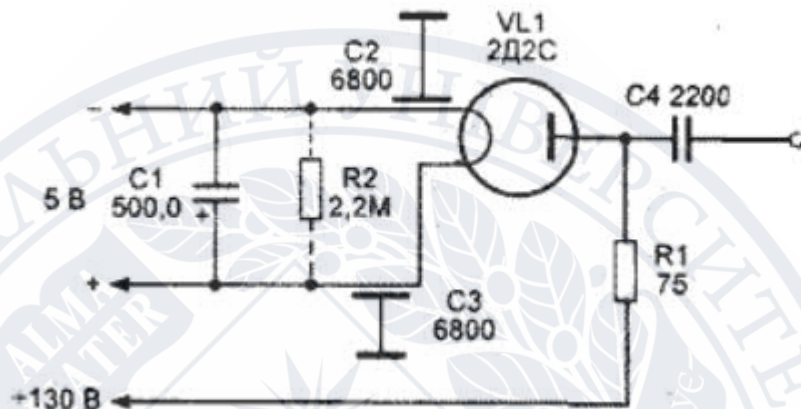


Рисунок 2. Схема генератору білого шуму

Джерелом шуму є напівпровідниковий діод - стабілітрон VD1 типу КС168, що працює в режимі лавинного пробоя при дуже малому струмі. Сила струму через стабілітрон VD1 становить лише близько 100 мкА. Шум, як корисний сигнал, знімається з катода стабілітрона VD1 і через конденсатор C1 надходить на інвертується вхід операційного підсилювача DA1 типу КР140УД1208. На НЕ інвертується вхід цього підсилювача надходить напруга зсуву, що дорівнює половині напруги живлення з дільника напруги виконаного на резисторах R2 і R3. Режим роботи мікросхеми визначається резистором R5, а коефіцієнт посилення - резистором R4. З навантаження підсилювача, змінного резистора R6, посилене напруга шуму надходить на підсилювач потужності, виконаний на мікросхемі DA2 типу К174ХА10. З виходу підсилювача шумовий сигнал через конденсатор C4 надходить на малогабаритний широкосмуговий гучномовець В1. Рівень шуму регулюється резистором R6[8].

Стабілітрон VD1 генерує шум в широкому діапазоні частот від одиниць герц до десятків мегагерц. Однак на практиці він обмежений АЧХ підсилювача і гучномовця. Стабілітрон VD1 підбирається по максимальному рівню шуму, так як стабілітрони представляють собою некалібрований джерело шуму. Він може бути будь-яким з напругою стабілізації менш напруги харчування.

Мікросхему DA1 можна замінити на КР1407УД2 або будь-який операційний підсилювач з високою граничною частотою коефіцієнта одиничного посилення. Замість підсилювача на DA2 можна використовувати будь-який УЗЧ.

Для отримання каліброваного за рівнем шуму генератора використовують спеціальні шумливі вакуумні діоди. Спектральна щільність потужності, що генерується шуму пропорційна анодному току діода. Широке поширення отримали шумові діоди двох типів 2ДЗБ і 2Д2С. Перший генерує шуму смузі до 30 МГц, а другий - до 600 МГц. Принципова схема генератора шуму на шумливих вакуумних діодах наведена на рисунку 3.[8]

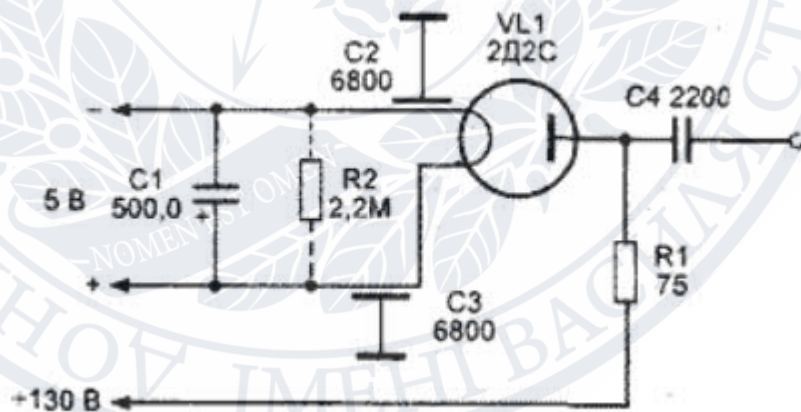


Рисунок 3. Генератор шуму на вакуумній лампі

Резистор R1 типу МЛТ-0,25. Резистор R2 дротяний, він використовується спільно з діодом 2ДЗБ. Харчування генератора здійснюється від спеціального блоку, схема якого наведена на рисунку 4.



Цифровий шум являє собою тимчасової випадковий процес, близький за своїми властивостями до процесу фізичних шумів і називається тому псевдовипадковим процесом. Цифрова послідовність двійкових символів в цифрових генераторах шуму називається псевдовипадковою послідовністю, що представляє собою послідовність прямокутних імпульсів псевдовипадкової тривалості з псевдовипадковими інтервалами між ними. Період повторення всієї послідовності значно перевищує найбільший інтервал між імпульсами. Найбільш часто застосовуються послідовності максимальної довжини - М-послідовності, які формуються за допомогою регістрів зсуву і суматори за модулем 2, що використовуються для отримання сигналу зворотного зв'язку.[9]

Принципова схема генератора шуму з рівномірною спектральною щільністю в робочому діапазоні частот наведена на рисунку 5.



Тактовий генератор виконаний на елементах DD2.3 і DD2.4 за схемою мультівібратора. З виходу генератора послідовність прямокутних імпульсів з частотою проходження близько 100 кГц надходить на входи "С" регістрів зсуву DD1.1 і DD1.2, що утворюють 8-Разрядність регістр зсуву. Запис інформації в регістр відбувається по входах "D". На вхід "D" регістра DD1.1 сигнал надходить з елемента зворотного зв'язку суматора по модулю 2 - DD2.1. При включенні харчування можливо стан регістрів, коли на всіх виходах присутні низькі рівні. Так як в регістрах М-послідовності заборонено появу нульовий комбінації, то в схему введена ланцюг запуску генератора, виконана на елементі DD2.2. При включенні харчування останній формує на своєму виході рівень логічної одиниці, який виводить регістр з нульового стану. На подальшу роботу генератора ланцюг запуску не робить ніякого впливу. Сформований псевдовипадковий сигнал знімається з 8-го розряду регістра зсуву і надходить для подальшого посилення і випромінювання. Напруга джерела живлення може бути від 3 до 15 В.[11]

У пристрої використано КМОП мікросхеми серії 561, їх можна замінити на мікротомі серій K564, K1561 або K176. В останньому випадку напруга живлення повинно бути 9 В.

Правильно зібраний генератор в налагодженні не потребує. Зміною тактової частоти можна регулювати діапазон частот шуму і інтервал між спектральними складовими для заданої нерівномірності спектра.[11]

1.2.3 Векторні генератори сигналів

Векторні генератори сигналів здійснюють перенесення сигналів модуляції (зовнішніх чи вбудованих, аналогових або цифрових) на ВЧ і висновок підсумкового сигналу.

Сигнал модуляції формується в цифровій формі і обробляється як потік комплексних I/Q-даних в смузі частот модулюючого сигналу. Обробка може включати в себе цифрову фільтрацію і (при необхідності) обмеження амплітуди (усічення); вона також може включати і інші функції, такі як формування несиметричних характеристик. Деякі генератори здатні додавати до формованому сигналу гауссовський шум. Така функція може використовуватися, наприклад, для визначення рівня шуму, при якому приймач ще здатний коректно демодулювати зашумлений сигнал. Більш того, деякі генератори здатні чисельно моделювати багатопроменеве поширення сигналу (завмирання, системи з багатьма входами-виходами), яке відбувається з ВЧ-сигналом. Як і додавання шуму, ця можливість також дозволяє визначити вплив характеристик вхідного сигналу на його демодуляцію приймачем. Як правило, всі обчислення для модулюючого сигналу відбуваються в реальному масштабі часу. Винятком є генератори сигналів довільної форми.[12]

Сформовані модулюючі I/Q-дані потім переносяться на робочу частоту (деякі векторні генератори працюють тільки з модулюють сигналами без перенесення на ВЧ). Векторні генератори сигналів часто також мають

аналогові або цифрові I/Q-входи для роботи з зовнішніми модулюють сигналами. I/Q-методи дозволяють реалізувати будь-який тип модуляції - простий або комплексний, цифровий або аналоговий - а також сигнали з однієї або декількома несучими.



Рисунок 6. I/Q-діаграма сигналу, сформованого векторних генератором сигналів

Сигнал зображений на рисунку 6, демодульований за допомогою аналізатора спектра, був сформований за допомогою векторного аналізатора сигналу. Звичайно, така "кружка з пивом в чотирьох квадрантах" не має практичної цінності, але дозволяє проілюструвати можливість сучасних векторних генераторів сформувати сигнал практично будь-який мислимої форми.[13]

Вимоги для векторних генераторів сигналів накладаються, головним чином, стандартами бездротового зв'язку, але також методами широкосмугового цифрової кабельної передачі і авіаційних і військових програм (генерація модульованих імпульсів).

Можна виділити наступні основні області застосування векторних генераторів сигналів:[13]

- Формування специфічних сигналів для стандартів бездротового зв'язку, цифрового радіо і ТБ, GPS, РЛС з модуляцією, і т.д.
- Випробування цифрових приймачів або модулів при розробці і виробництві
- Імітування спотворень сигналу (шум, загасання, усічення, внесення бітових помилок)
- Формування сигналів для багатоантенних систем (систем з багатьма входами/виходами або MIMO - multiple in / multiple out), з наявністю або відсутністю фазової когерентності для формування променя
- Формування модульованих помехових сигналів для блокуючих випробувань і вимірювання коефіцієнта придушення сусідніх каналів.

1.2.4 Генератори сигналів довільної форми (ARB-генератори)

Генератори сигналів довільної форми (ARB-генератори) - це спеціалізовані векторні генератори модулюють сигналів. Дані модуляції для ARB-генераторів розраховуються заздалегідь (а не в реальному часі) і зберігаються в пам'яті приладу. Потім дані з пам'яті можуть виводитися в реальному часі із заданою символічною швидкістю. Опція ARB-генератора є у багатьох векторних генераторів сигналів; см. меню вибору на малюнку 1-19. Нижче приведені відмінності ARB-генераторів від векторних генераторів, що працюють в реальному масштабі часу:[14]

- ARB-генератори не мають обмежень на зміст потоку I / Q-даних (звідси і назва "довільної")
- Є можливість формувати тільки обмежені за часом або періодичні сигнали (обсяг пам'яті обмежений)

Додатковими характеристиками ARB-генераторів є обсяг пам'яті та розмір слова для наборів I / Q-даних. Деякі ARB-генератори дозволяють

послідовно відтворювати різні сегменти пам'яті, що містять кілька заздалегідь розрахованих сигналів, без необхідності виконувати додаткові розрахунки.

Як і генератори сигналів, що працюють в реальному масштабі часу, ARB-генератори містять різні можливості для запуску, а також можуть одночасно з виводом сигналу виводити маркерні сигнали для управління підключеним обладнанням і вимірювальними приладами. Користувачі можуть об'єднувати різні сигнали різної тривалості для формування однієї тестової послідовності для виробничих випробувань (рисунк 7). [15]

Послідовність і тривалість сигналів визначається або всередині ARB-генератора через програми дистанційного керування, або за допомогою зовнішнього сигналу запуску. Наприклад, вихідна послідовність може складатися з потоків даних різної бітової швидкості, яку потрібно перевірити під час виробництва. [15]

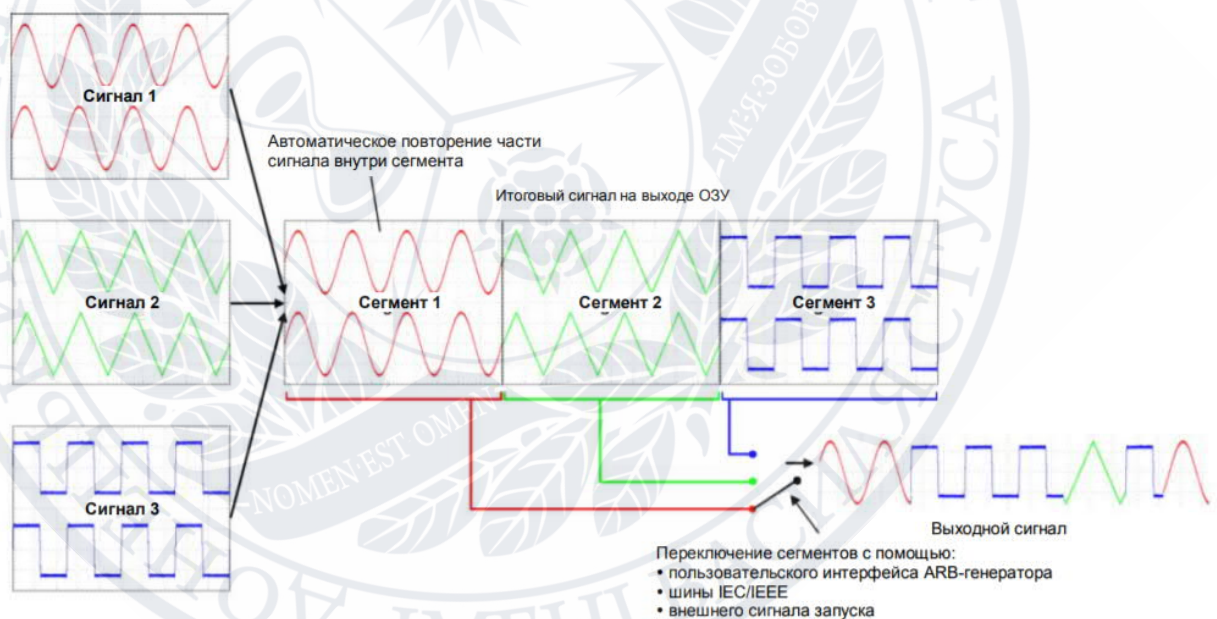


Рисунок 7. З'єднання різних сигналів в одну послідовність

Багато ARB-генератори можуть як модулюючого сигналу обчислювати адитивний гауссовський шум; деякі також здатні імітувати багатопроменеве поширення (завмирання) підсумкового ВЧ-сигналу або системи з декількома антенами (MIMO). У багатьох випадках виробники ARB-генераторів також пропонують програмне забезпечення для формування стандартних

модуючих послідовностей (набори I/Q-даних). Як приклад на малюнку 8 наведено кілька вікон імітаційного ПЗ «WinIQSIM2».[16]

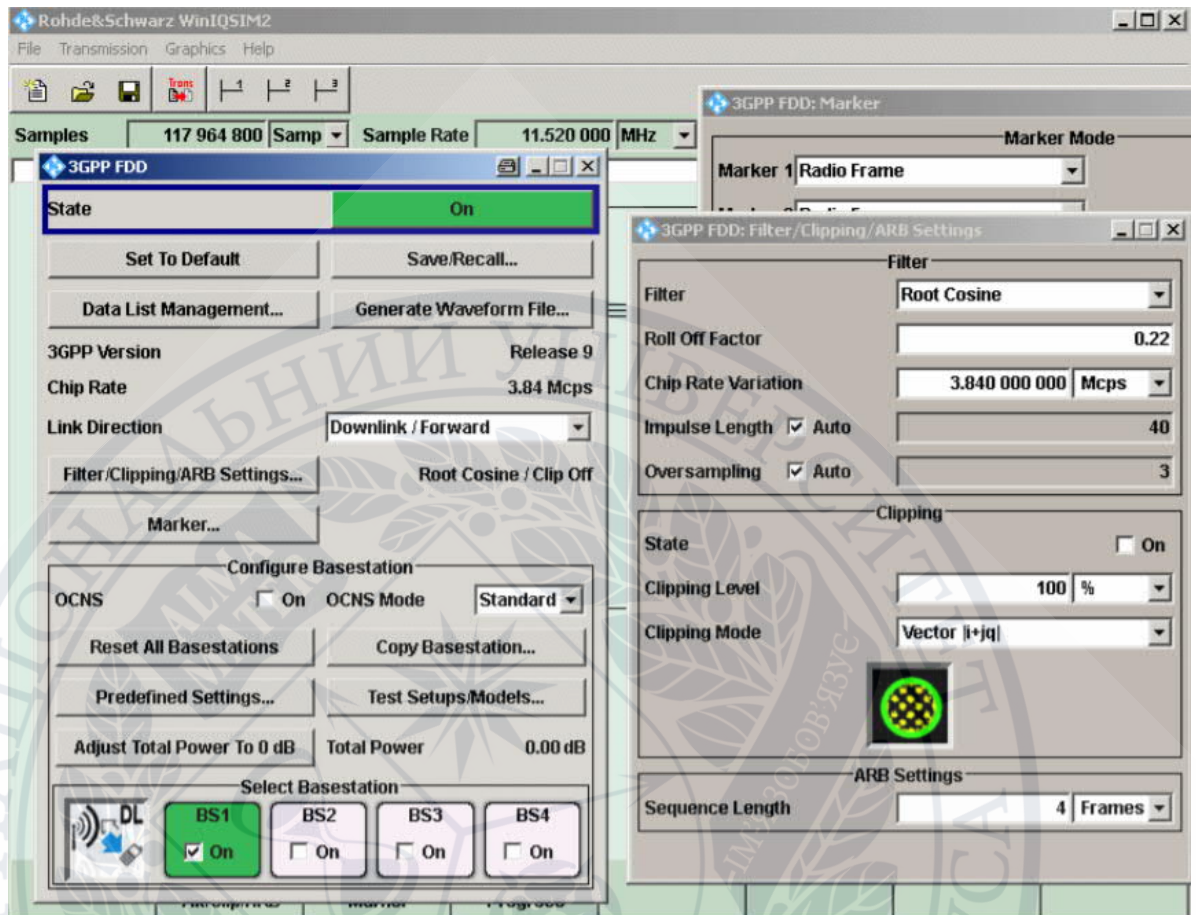


Рисунок 8. Програма для ПК, призначена для обчислення I / Q-даних для стандартних сигналів

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ШУМУ

Генератор шуму - це ще один загальний модуль синтезу, класифікований як генератор. Як випливає з назви, генератор шуму видає шум. Хоча генератори виводять частоти в дискретних спектрах (іншими словами, вони генерують конкретні частоти, що складають форму хвилі), генератори шуму виводять всі частоти, розподілені хаотично по всьому звуковому спектру. У цьому контексті шум означає не "небажаний ракет", а швидше "шиплячий" тип звуку, що містить усі частоти в межах чутного діапазону.

Системи синтезу часто дозволяють користувачеві вибирати між декількома видами шуму. Найпоширеніші варіанти - білий та рожевий. Білий шум складається з випадкового розподілу всіх звукових частот однакової амплітуди між будь-якими рівними смугами пропускання. Білий шум має тенденцію звучати як шипіння або статичний. Рожевий шум складається з випадкового розподілу всіх звукових частот однакової амплітуди між будь-якими октавами. Рожевий шум, як правило, звучить більше як помірний вітер.

Шум - це сигнал, що займає всі частоти, із спектральною плоскістю (на кожній полосі пропускання) пропорційною (або проти пропорційною) f^β (частотою в степенях β). До прикладу, у випадку білого шуму $\beta = 0$, у випадку корисного $\beta = 2$.

Кольори шуму - система термінів, що приписує деяким видам шумових сигналів певні кольори виходячи з аналогії між спектром сигналу довільної природи (точніше, його спектральної щільністю або, кажучи математично, параметрами розподілу випадкового процесу) і спектрами різних кольорів видимого світла. Ця абстракція широко використовується в галузях техніки, що мають справу з шумом (акустика, електроніка, фізика і т. Д.). Багато з таких визначень розглядають спектр сигналу на всіх частотах. Кольорові відповідності різних типів шумового сигналу визначаються за допомогою

графіків (гістограм) спектральної щільності, тобто розподілу потужності сигналу по частотах

Білий шум - спектральна плотність звуку розподілена рівномірно за всіма частотами (на всіх частотах потужності сигналів однакова). Інакше говорячи, білий шум має плоский спектр частот у лінійному просторі. До прикладу, енергія полоси між 40 і 60 Гц буде рівною енергією полоси між 4000 і 4020 Гц (і повідомляє будь-яку позицію шириною в 20 Гц).

Білий шум - це ідеальний конструктор, набуває абсолютно чорного тіла. Так як всі частоти білого шуму надають енергію, а загальна потужність такого сигналу буде рівною нескінченності. На практиці сигнал називається «білим», якщо він має плоский спектр в обмеженому діапазоні частот.

Термін «білий шум» зазвичай застосовується до тону, що має автокорреляційну функцію, математично описується дельта-функцією Дірака по всіх вимірах багатовимірного простору, в якому цей сигнал розглядається. Сигнали, що володіють цією властивістю, можуть розглядатися як білий шум. Дана статистична властивість є основним для сигналів такого типу.

Те, що білий шум некоррельований за часом (або по іншому аргументу), не визначає його значень у тимчасовій (або будь-який інший розглянутої аргументної) області. Набори, що приймаються сигналом, можуть бути довільними з точністю до головного статистичного властивості (проте постійна складова такого сигналу повинна бути дорівнює нулю). Наприклад, двійковий сигнал, який може приймати тільки значення, рівні нулю або одиниці, буде білим шумом тільки якщо послідовність нулів і одиниць буде некоррельованою. Сигнали, які мають безперервний розподіл (наприклад, нормальний розподіл), також можуть бути білим шумом. Іноді помилково передбачається, що Гаусовий шум (тобто шум з Гаусовим розподілом по амплітуді - см. Нормальний розподіл) обов'язково є білим шумом. Однак ці поняття нееквівалентні. Гаусовий шум передбачає розподіл значень сигналу у вигляді нормального розподілу, тоді як термін «білий» має відношення до кореляції сигналу в два різних моменту часу (ця кореляція не залежить від

розподілу амплітуди шуму). Білий шум може мати як розподіл Гаусса, так і розподіл Пуассона, Коші і т. Д. Гауссовський білий шум в якості моделі добре підходить для математичного опису багатьох природних процесів (див. Адитивний білий гауссовський шум).

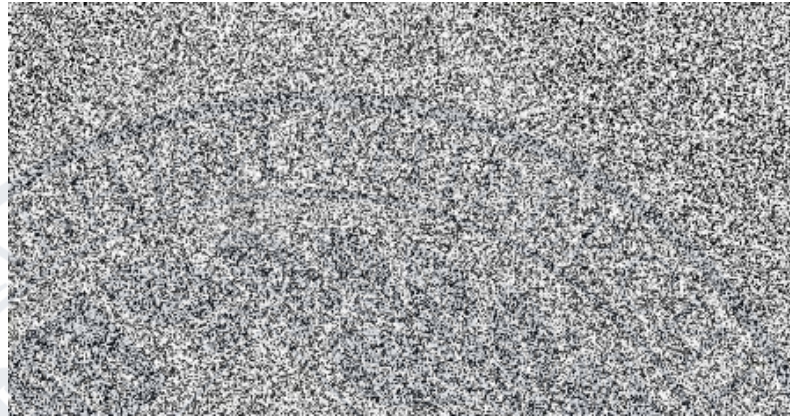


Рисунок 9. Білий шум

Рожевий шум (фліккер-шум, $1/f$ -шум) - з підвищенням частот спектральної щільності зменшується на 3 дБ на кожну октаву (щільність протилежно пропорційна частоті). Так як рожевий шум має плоский спектр частот у логарифмічному просторі.

Приклад рожевого шуму - звук пролітаючого гелікоптера. Рожевий шум виявляється, наприклад, в серцевих ритмах, в графіках електричної активності мозку, в електромагнітному виведенні космічних тел.

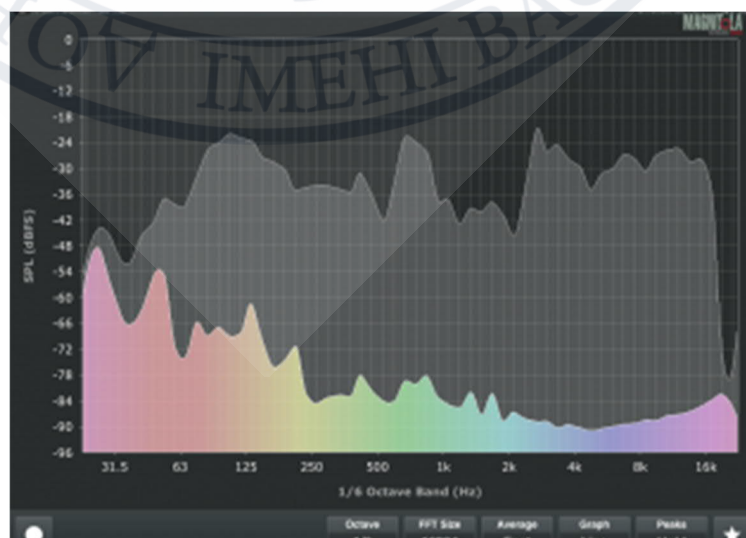


Рисунок 10. Рожевий шум

Спектральна щільність рожевого шуму визначається формулою $\sim 1 / f$ (щільність обернено пропорційна частоті), тобто він є рівномірним в логарифмічною шкалою частот.

Наприклад, потужність сигналу в смузі частот між 40 і 60 герц дорівнює потужності в смузі між 4000 і 6000 герц. Спектральна щільність такого сигналу в порівнянні з білим шумом загасає на 3 децибели на кожен октаву. Приклад рожевого шуму - звук пролітає вертольота. Рожевий шум виявляється, наприклад, в серцевих ритмах, в графіках електричної активності мозку, в електромагнітному випромінюванні космічних тіл.

Іноді рожевим шумом називають будь-який шум, спектральна щільність якого зменшується зі збільшенням частоти.

Спектральна щільність червоного шуму пропорційна $1 / f^2$, де f - частота. Це означає, що на низьких частотах шум має більше енергії, навіть більше, ніж рожевий шум. Енергія шуму падає на 6 децибел на октаву. Акустичний червоний шум чується як приглушений, в порівнянні з білим або рожевим шумом. Може бути отриманий, якщо проінтегрувати білий шум, або за допомогою алгоритму, що симулює броунівський рух. Спектр червоного шуму (в логарифмічною шкалою) дзеркально протилежний спектру фіолетового. На слух броунівський шум сприймається більш «теплим», ніж білий. Іноді (зазвичай в текстах, переведених з англійської мови) цей шум називають також коричневим, сліпо переводячи прізвище Роберта Броуна (Brown) на українській - причому з англійської, хоча Броун був шотландцем. Втім, коричневий і червоний кольори спектрально дуже близькі.

Синій шум - вид сигналу, чия спектральна щільність збільшується на 3 дБ на октаву. Тобто його спектральна щільність пропорційна частоті і, аналогічно білого шуму, на практиці він повинен бути обмежений за частотою (Рис.6). На слух синій шум сприймається більш «холодним», «кислим», ніж

білий. Синій шум виходить, якщо продифференціювати рожевий шум; їх спектри дзеркальні.

Фіолетовий шум - вид сигналу, чия спектральна щільність збільшується на 6 дБ на октаву. Тобто його спектральна щільність пропорційна квадрату частоти i , аналогічно білого шуму, на практиці він повинен бути органічний по частоті. Фіолетовий шум виходить, якщо продифференціювати білий шум. Спектр фіолетового шуму дзеркально протилежний спектру червоного.

Термін сірий шум відноситься до шумового сигналу, який має однакову гучність для людського вуха на всім діапазоні частот. Спектр сірого шуму виходить, якщо скласти спектри броунівського і фіолетового шумів. В спектрі сірого шуму видно великий «провал» на середніх частотах, проте людське вухо сприймає сірий шум точно так же, як і білий.

Існують і інші, «менш офіційні» кольору:

Помаранчевий шум - квазістаціонарний шум з кінцевої спектральної щільністю. Спектр такого шуму має смужки нульової енергії, розсіяні по всьому спектру. Ці смужки розташовуються на частотах музичних нот.

Червоний шум - може бути як синонімом броунівського або рожевого шуму, так і позначенням природного шуму, характерного для великих водойм - морів і океанів, що поглинають високі частоти. Червоний шум чути з берега від віддалених об'єктів, що знаходяться в океані.

Злена шум - шум природного середовища. Подібний рожевому шуму з посиленою областю частот в районі 500 Гц

Термін «чёрний шум» має кілька визначень:

- Тиша
- Шум зі спектром $1 / f^\beta$, де $\beta > 2$ (Manfred Schroeder, «Fractals, chaos, power laws»). Використовується для моделювання різних природних процесів.

Вважається характеристикою "природних і штучних катастроф, таких як повені, обвали ринку і т. П."

- Ультразвуковий білий шум (з частотою більше 20 кГц), аналогічний т. Н. «Чорному світлі» (з частотами занадто високими, щоб його можна було сприймати, але здатному впливати на спостерігача або прилади).
- Шум, спектр якого має переважно нульову енергію за винятком декількох піків.

Адитивний білий Гаусовий шум є одним із типів перешкод в каналі передачі інформації. Характеризується рівномірністю, тобто однаковою на всіх частотах, спектральною щільністю потужності, нормально розподіленими значеннями часу та адитивним способом впливу на сигнал. Найпоширеніший тип шуму, що використовується для розрахунку та моделювання систем радіозв'язку. Термін "добавка" означає, що цей тип шуму додається до корисного сигналу і статистично не залежить від сигналу. На відміну від адитивного, ви можете вказати мультиплікативний шум - шум, який множиться із сигналом.

3.1 Розрахунок математичної моделі шуму

Усі розрахунки будуть проводитись у MathCad. Необхідні кроки для розрахунку моделі шуму:

1. Сгенерувати випадкову початкову фазу за допомогою функції $runif(m, a, b)$ – ця функція повертає вектор m випадкових чисел, що мають рівномірний розподіл, в якому b і a є граничними точками інтервалу. $a < b$.

$$A := runif(200, -\pi, \pi)$$

2. Встановити напівширину полоси частот $\Delta\omega$

$$\Delta\omega := 0.1$$

3. Встановити кількість незалежних компонентів N

$$N := 50$$

4. Встановити проміжок t

$$t := 0, 0.1 \dots 10000$$

5. Провести розрахунок $U(t)$ за допомогою наступної формули:

$$U(t) := \sum_{n=0}^N \left[\frac{1}{N} * \sin \left[\left(0.95 + n * \frac{\Delta\omega}{N} \right) * t + A_{n+100} * 1 + \pi * \sin[(A_{n+100} * 0.01) * t] \right] \right]$$

Була отримана наступна модель шуму:

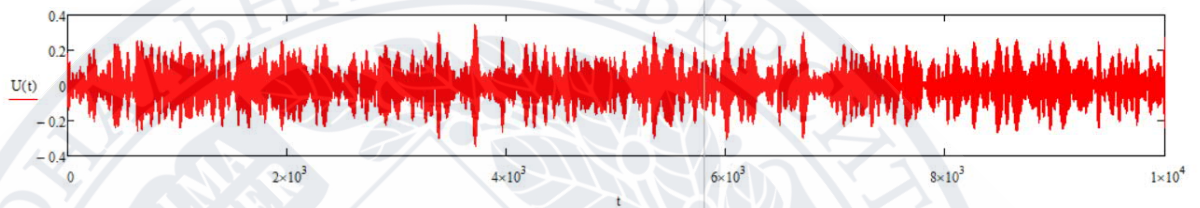


Рисунок 11. Модель шуму

Дані з цієї моделі можливо вивести до таблиці або експортувати в інший файл:

U(t) =	
	0.099
	0.116
	0.132
	0.145
	0.156
	0.166
	0.172
	0.177
	0.179
	0.179
	0.177
	0.173
	0.167
	0.159
	0.149
	...

Рисунок 12. Таблиця даних

3.2 Аналіз математичних моделей каналів зв'язку з білим гаусовим шумом

Канал зв'язку з білим Гаусовим шумом, є найбільш поширеною серед використовуваних моделей каналів зв'язку. Це пов'язано з тим, що в незалежності від характеру фізичної лінії зв'язку (кручена пара, коаксіальний кабель, оптоволокну, радіоканал і т.д.) і ступеня її захищеності від зовнішніх перешкод, в ній все одно присутній білий Гаусовий шум, що, в свою чергу, пояснюється самою його природою, а саме тим, що він виникає в результаті теплового руху електронів, яке присутнє в будь-якому провідному середовищі.

У даному підрозділі розглядаються існуючі математичні моделі каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом, їх переваги, недоліки та обмеження. На підставі проведеного аналізу обґрунтовується необхідність розробки нової математичної моделі і формується перелік вимог, відповідність яким дозволило б виконувати якісно нові дослідження. На закінчення наводиться розробка критеріїв оцінки адекватності математичної моделі.

3.2.1 Аналіз існуючих математичних моделей каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом

На сьогоднішній день, фактично, найбільш поширена всього одна математична модель для каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом, яка базується на використанні точок сигнального простору. Її суть полягає в перетворенні вихідного вектора даних, що складається з символів вихідного алфавіту модулятора, в точки сигнального простору згідно обраному способу модуляції, накладення білого Гаусового шуму на отримані значення і перетворенні зашумлених точок сигнального простору в вектор вихідних даних (символів вихідного алфавіту модулятора). На прикладі з багатопозиційної цифрової фазової маніпуляцією це може бути висловлене такими аналітичними виразами:

- перетворення символу вихідного алфавіту модулятора в точку сигнального простору:

$$S_i = e^{\frac{2\pi i}{M^j}} \quad (4.1)$$

де j – уявна одиниця;

M - розмір алфавіту модулятора;

i - символ алфавіту модулятора в діапазоні $[0, M - 1]$;

S_i - точка сигнального простору;

- накладення білого гауссова шуму на точку сигнального простору:

$$R_i = S_i + n \quad (4.2)$$

де n - комплексне значення білого Гаусового шуму;

R_i - зашумлена точка сигнального простору;

- перетворення зашумленої точки сигнального простору в символ вихідного алфавіту:

$$x = \left[\frac{j * M * \ln R_i}{2\pi} \right] \bmod M \quad (4.3)$$

де j - уявна одиниця;

M - розмір алфавіту модулятора;

R_i - зашумлена точка сигнального простору;

$[]$ - оператор округлення, а \bmod - оператор взяття по модулю.

Ми бачимо, що дана математична модель дійсно в повній мірі описує процес передачі даних по каналах зв'язку з білим Гаусовим шумом і при це добре підходить для демонстративних цілей (тому що дозволяє візуалізувати передані і прийняті точки сигнального простору). Однак, незважаючи на доведену адекватність самої моделі, вона цілком ігнорує процеси, що відбуваються як в середовищі передачі, так і в передавачі і в приймачі, які є

невід'ємними частинами реальних каналів зв'язку. З одного боку, це призводить до малої кількості математичних операцій, необхідних для виконання процесу моделювання (іншими словами, програмні реалізації цієї моделі мають високу швидкість роботи), але з іншого, сильно обмежує область її застосувань.

Таким чином, дана математична модель не дозволяє моделювати і вивчати процеси, що відбуваються в середовищі передачі даних, передавачі і приймачі, що, наприклад, призводить до того, що з її допомогою неможливо перевірити істинність твердження, з якого випливає, що для багатопозиційною когерентної цифрової частотної маніпуляції в каналі зв'язку з білим Гаусовим шумом оптимальним з точки зору завадостійкості рознесенням по частоті є

$$\Delta F \approx 0.715 * F_s \quad (4.4)$$

де F_s - символічна частота, на якій працює канал зв'язку.

В якості альтернативної математичної моделі можна було б розглянути інтуїтивну векторну математичну модель каналу зв'язку з білим Гаусовим шумом (що базується на уявленні тимчасових процесів в каналах зв'язку у вигляді тимчасових векторів - серій відліків з тимчасовими мітками), проте не дивлячись на гадану простоту цієї математичної моделі, на сьогоднішній день не існує жодного її повноцінного формального опису, а існуючі реалізації занадто приватні і, як правило, можуть бути застосовані лише для специфічних типів каналів зв'язку.

3.2.2 Розробка вимог до математичної моделі каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом

В результаті аналізу існуючих математичних моделей каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом було зроблено висновок про необхідність розробки нової математичної моделі, яка дозволила б вивчати і моделювати не тільки процес передачі даних в загальному, але і фізичні процеси, що відбуваються

всередині окремих компонентів самого каналу зв'язку (передавач, середовище передачі, приймач).

Виходячи з цього, можна сформулювати наступний набір вимог, яким повинна відповідати розробляема математична модель:

1. математична модель повинна бути адекватною - поточна й очевидна вимога, суть якої полягає в тому, що математична модель повинна відповідати дійсності, а дані отримані з її допомогою повинні відповідати теоретичним (при умові, що достовірно відомо, що з ними усе гаразд) і емпіричним даним, отриманим за допомогою інших математичних моделей (за умови, що достовірно відомо, що ці математичні моделі адекватні).

2. математична модель повинна бути реалізованою - ще одна очевидна, проте не менш необхідна, вимога, яка говорить про те, що математична модель повинна бути реалізованою з використанням сучасних технічних засобів (наприклад, як комп'ютерна програма або модель в якомусь комп'ютерному середовищі моделювання) і повинна давати результат, при умови адекватної реалізації, за прийнятну кількість часу (іншими словами, тривалість процесу моделювання з використанням сучасних технічних засобів не повинна перевищувати термін, за який результати моделювання можуть втратити актуальність);

3. математична модель повинна дозволяти виконувати моделювання процесу передачі даних в цілому - незважаючи на інші обмеження та вимоги, які можуть накладатися на математичну модель для отримання будь-яких специфічних властивостей, вона повинна бути застосовна для моделювання процесу передачі даних по каналу зв'язку з білим Гаусовим шумом в цілому (наприклад, для вивчення можливостей бітових і/або символьних помилок для різних способів модуляції даних в певних діапазонах значень відносин сигнал-шум);

4. математична модель повинна дозволяти виконувати моделювання процесів, що відбуваються в передавачі і, при необхідності, давати можливість

впливати на них - якісно нову властивість математичної моделі (в порівнянні з розглянутою вище математичною моделлю), суть якого полягає в тому, що математична модель повинна включати в себе передавач, який відповідає за перетворення вхідних даних в сигнали, які будуть використані для подальшої передачі даних на приймаючу сторону, дозволяти спостерігати за процесами, що відбуваються в ньому і, при необхідності, давати можливість впливати на них для отримання нових експериментальних даних;

5. математична модель повинна дозволяти виконувати моделювання процесів, що відбуваються безпосередньо в середовищі передачі даних і, при необхідності, давати можливість впливати на них – якісно нову властивість математичної моделі (в порівнянні з розглянутою вище математичною моделлю), суть якої полягає у включенні середовища передачі даних безпосередньо в математичну модель таким чином, щоб була можливість спостерігати за процесами, що відбуваються в ній і, при необхідності, давати можливість впливати на них;

6. математична модель повинна дозволяти виконувати моделювання процесів, що відбуваються в приймальнику і, при необхідності, давати можливість впливати на них - якісно нову властивість моделі (в порівнянні з розглянутою вище математичною моделлю), суть якої в тому, що математична модель повинна включати в себе приймач, який відповідає за розпізнавання і декодування зашумлених сигналів, отриманих з лінії зв'язку, таким чином, щоб була можливість спостерігати за процесами, що відбуваються в ньому і, при необхідності, давати можливість впливати на них;

7. математична модель повинна бути розширюваною - властивість математичної моделі, яка свідчить, що математична модель не повинна бути намертво обмежена будь-якими своїми компонентами і повинна мати такий вигляд, що, при необхідності, могла б бути розширена для застосування в більш широкій області.

Виходячи з останнього з перерахованих вище вимог, що розробляема математична модель повинна бути застосовна в широкому колі завдань.

Однак, виходячи з 4-го і 5-го пунктів перерахованих вище вимог очевидно, що математична модель такого роду не може бути абсолютно універсальною. Іншими словами, не існує такого аналітичного виразу, яким могла б бути описана бажана математична модель так, щоб вона була застосовна для будь-якого завдання без яких-небудь допрацювань і/або адаптацій.

У зв'язку з цим, передбачувані реалізації можуть бути обмежені певними типами приймачів і передавачів, однак повинні описувати можливості по розширенню шляхом включень аналітичних виразів для інших приймачів і передавачів з узгодженням розмірностей і порядків величин.

3.2.3 Розробка критеріїв адекватності математичної моделі

В якості необхідних і достатніх критеріїв, відповідність яким дозволило б прийняти позитивне рішення щодо питання адекватності математичної моделі каналу зв'язку з білим Гаусовим шумом, можна назвати наступні:

1. візуалізація процесів, що відбуваються в передавачі, лінії зв'язку і приймачі повинна відповідати очікуваній згідно теоретичного представлення про ці процеси;
2. Залежності ймовірностей символної помилки побудованих за допомогою математичної моделі повинні відповідати очікуваним теоретичним даним.

ВИСНОВОК

Була розібрана природа шуму, його властивості та сфери його застосування, варіації каналів зв'язку та генераторів шуму для відтворення математичної моделі шуму, а також сфери їх застосування.

В результаті аналізу існуючих математичних моделей каналів зв'язку з білим Гаусовим шумом був зроблений висновок про те, що дані математичні моделі мають ряд обмежень, через які вони не можуть застосовуватися для вивчення ряду процесів, що відбуваються в каналах зв'язку.

З огляду на результати проведеного аналізу було сформовано і обґрунтовано перелік вимог до бажаної математичної моделі.

На закінчення був розроблений набір критеріїв для оцінки його потенційної математичної моделі, яка могла б відповідати описаним вимогам.

1. Thermal Agitation of Electricity in Conductors. J.B. Johnson. 1928.
2. Digital Communication. J.G. Proakis. Masoud Salehi. 2007
3. Bit Error Rate (BER) for frequency shift keying with coherent demodulation: <http://www.dsblog.com/2007/08/30/bit-error-rate-for-frequency-shift-keying-with-coherent-demodulation/>
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BB%D1%8B%D0%B9_%D1%88%D1%83%D0%BC
5. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D1%88%D1%83%D0%BC%D0%B0
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%88%D1%83%D0%BC
8. <https://prograham.jimdofree.com/%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/>
9. <https://habr.com/ru/post/321874/>
10. <https://coderoad.ru/12945387/%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-%D1%88%D1%83%D0%BC%D0%B0-random-%D0%B2-Python>
11. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1347079>
12. https://www.researchgate.net/publication/3044832_A_Gaussian_noise_generator_for_hardware-based_simulations
13. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00159658>
14. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_1rus_Modulation_Signal_Generation.pdf
15. https://www.equipnet.ru/articles/tech/tech_54361.html
16. <https://www.electronicdesign.com/home/whitepaper/21803147/build-a-simple-precision-pinknoise-generator-pdf-download>
17. <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21799090/build-a-simple-precision-pinknoise-generator>
18. https://kpfu.ru/staff_files/F233095282/30.08.15_Tjurin__Metod_pryamogo_cifrovogo_sinteza....pdf
19. https://cxem.net/software/digital_signal_generator.php
20. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_\(%D1%84%D1%96%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_(%D1%84%D1%96%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0))
21. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Signal-and-Noise-Generator-40002040A.pdf>
22. Thermal Agitation of Electricity in Conductors. J.B. Johnson. 1928.

23. Digital Communication. J.G. Proakis. Masoud Salehi. 2007

24. Bit Error Rate (BER) for frequency shift keying with coherent demodulation: <http://www.dsblog.com/2007/08/30/bit-error-rate-for-frequency-shift-keying-with-coherent-demodulation/>

