

Перспективи використання ефекту Джозефсона для побудови прецизійних синтезаторів частот

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проводиться аналіз існуючих проблем генерування сигналів терагерцового діапазону. Наводяться аргументи підвищення стабільності коливань та зменшення фазового шуму при використанні надпровідникових елементів.

Ключові слова: Синтезатори частот, переходи Джозефсона, надпровідникові логічні елементи, одноквантові імпульси, швидка одноквантова логіка.

Abstract

The paper analyzes existing problems in generating terahertz signals. Arguments are presented for increasing oscillation stability and reducing phase noise when using superconducting elements.

Keywords: Frequency synthesizers, Josephson junctions, superconducting logic elements, single-quantum pulses, fast single-quantum logic.

Вступ

Сучасна радіоелектроніка уже давно наблизилась до фізичної межі можливостей напівпровідникових технологій у задачах синтезу частот. Класичні схеми на основі ФАПЧ (PLL) та прямого цифрового синтезу (DDS) на базі SiGe або CMOS технологій стикаються з фундаментальними обмеженнями:

– тепловий шум: При кімнатних температурах неможливо опустити поріг шумів нижче певного рівня без суттєвого збільшення енергоспоживання;

– фазові шуми та джиттер: У класичних лічильниках, ЦАП, опорних генераторах виникає джиттер фронту сигналу через нелінійність передавальної характеристики, що обмежує динамічний діапазон;

– обмеження швидкодії: Верхня робоча межа тактових частот для кремнію знаходиться в межах 10-20 ГГц, що ускладнює вихід у терагерцовий діапазон без використання помножувачів, які значно погіршують спектральну чистоту;

– нелінійність: Каскади підсилення та формування сигналів на базі RLC компонентів та напівпровідників на основі кремнію мають, попри використання методів корекції та стабілізації, характеризуються нелінійністю в робочому діапазоні частот, та недостатньою крутизною характеристики АЧХ для фільтрування гармонік.

Відкриття явища надпровідності та ефекту Джозефсона дозволяє побудову вузлів радіоелектронних систем з діапазоном робочих частот сотні ГГц.

Мета роботи – Обґрунтування використання в синтезаторах частот елементів на основі ефекту Джозефсона та швидкої одноквантової логіки (RSFQ/ERSFQ), що дозволяє генерувати сигнали з квантовою точністю та метрологічною стабільністю.

Теоретичні засади доцільності використання ефекту Джозефсона

В основі пропонованого підходу лежить нестационарний ефект Джозефсона. На відміну від класичних генераторів, де частота залежить від RLC-параметрів елементів, та робочих точок напівпровідників, що мають температурний дрейф та старіння. Частота коливань f_J у переході Джозефсона жорстко пов'язана з напругою U [1]:

$$f_J = K_J \cdot U = \frac{2e}{h} U \quad (1)$$

де $K_J = 483,5979$ ГГц/мВ, e – заряд електрона, h – стала Планка.

Оскільки ця залежність є абсолютно лінійною і базується на фундаментальних константах ми можемо отримати джерело тактового сигналу з параметрами близькими до ідеальних.

Іншим важливим аспектом є особливість процесу квантування магнітного потоку. Імпульс напруги, що генерується при проходженні магнітного потоку крізь надпровідний контур набуває лише дискретних кванту Φ_0 значень[2]. Відповідно нелінійність амплітудної характеристики виключаються на етапі переходу до одноквантових імпульсів.

Архітектура синтезатора на основі RSFQ-логіки

Для реалізації широкопasmового синтезатора пропонується використання архітектури прямого цифрового синтезу (DDS) з використанням надпровідникової логіки, що наведено на рисунку 1:

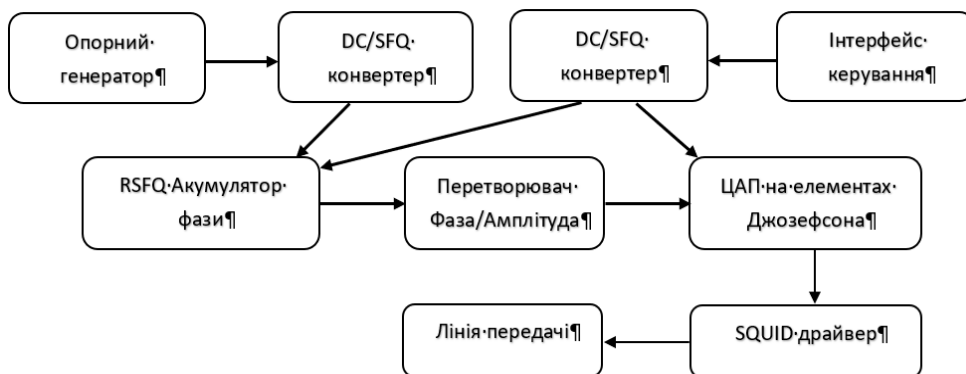


Рисунок 1 – Структурна схема DDS генератора з використанням надпровідних елементів

При такому підході параметри згенерованого сигналу повністю формуються в надпровідниковій зоні.

У DC/SFQ перетворювачі [3], зв'язок між напівпровідниковою електронікою керування та надпровідною зоною здійснюється через перетворювачі входних електричних сигналів тактового сигналу та коду частоти у послідовність SFQ-імпульсів. Цей каскад мінімізує проникнення нелінійностей опорних сигналів у чутливу надпровідну зону.

Акумулятор фази RSFQ, визначає швидкодію всієї системи. Він побудований на базі RSFQ-суматорів та регістрів зсуву. На кожному такті опорної частоти відбувається додавання коду частоти до поточного вмісту акумулятора. На відміну від CMOS-транзисторів, перемикання логічних елементів відбувається за час порядку 1–2пс. Завдяки відсутності перезарядки паразитних ємностей, акумулятор здатний працювати лінійно на частотах, що наближаються до частоти коливань які мають місце при використанні джозефсонівських переходів. Це дозволяє генерувати широкопasmові сигнали без необхідності множення частоти, що зберігає чистоту спектру.

Замість формування напруги через резистивну матрицю класичних ЦАП, використовується квантовий ефект Джозефсона. Вихідна напруга формується як усереднена в часі послідовність SFQ-імпульсів [4]. Оскільки напруга на переході жорстко пов'язана з частотою проходження квантів потоку. Це забезпечує абсолютну лінійність перетворення. Відхилення амплітуди можливі лише внаслідок теплових флуктуацій, які при навіть для високотемпературної напівпровідності є малими.

Аналіз фазових шумів та спектральної чистоти

Як результат роботи синтезатора можна отримати наступні ключові переваги:

- відсутність джиттера: У надпровідному стані носії заряду, куперівські пари, є бозонами і рухаються корельовано в єдиному квантовому стані, що унеможливує коливання фронту сигналу;
- температурний фактор: Робота при температурах високотемпературної надпровідності зменшує тепловий шум на два порядки порівняно з кімнатною температурою;
- висока лінійність: Оскільки площа кожного імпульсу є фундаментальною константою, відсутня диференціальна нелінійність, характерна для напівпровідникових ЦАП;
- очікувані характеристики: Теоретично досяжний рівень динамічного діапазону перевищує 100дБ навіть на частотах в десятки та сотні ГГц, що є недосяжним для напівпровідників;
- широка смуга робочих частот: Оскільки в структурі відсутні елементи формування частотної характеристики, синтезатор може працювати у надзвичайно широкому частотному діапазоні.

Недоліки реалізації

Потенційними недоліками запропонованого методу можна назвати:

- кількість елементів: Одиночний перехід генерує сигнали амплітудою до одиниць мікрівольт. Для отримання практично значущих рівнів, наприклад 1 мВ, необхідно створювати послідовні масиви з тисяч синхронізованих переходів [2] (Lumped Josephson Arrays).
- тепловий режим: Необхідність використання кріостабілізуючих систем замкненого циклу Gifford-McMahon або PTR що призводить до збільшення габаритів і маси, проте такі рішення є прийнятним для стаціонарних радарів, систем супутникового зв'язку та лабораторій.
- передача високочастотного сигналу з кріогенної зони в кімнату вимагає ретельного проектування широкосмугових ліній передачі з мінімальними тепловими втратами та температурною залежністю.

Висновки

Проведений аналіз існуючих обмежень напівпровідникових елементів, та функціональних переваг надпровідної одноквантової логіки з використанням ефекту Джозефсона, що дозволяє перейти від парадигми генерації сигналу до парадигми квантового синтезу сигналів в субтерагерцовому діапазоні частот з надзвичайно високою стабільністю.

Розроблена структурна схема дозволяє визначити подальші напрямки дослідження шляхів зменшення фазового шуму синтезаторів частот, та розглядати аналогічний підхід для формування високо стабільних сигналів гігагерцового діапазону.

Перспективними напрямками використання таких синтезаторів є:

Створення еталонних опорних генераторів та синтезаторів частот для радіоастрономії

Створення спектральних газоаналізаторів наприклад верхніх шарів атмосфери.

Розробка повністю цифрових приймально-передавальних трактів для систем 6G.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. М. М. Будник, Ю.В. Пустовіт, О. В. Прокопенко. Надпровідникова електроніка: електронний навчальний посібник / – Київ: ФРЕКС КНУ імені Тараса Шевченка, 2020. – 205 с.
2. О. Р. Yanenko, K. L. Shevchenko, and V. M. Kychak, Methods and means of formation, processing and use of lowintensity electromagnetic signals, monogr. Vinnytsya, Ukraine: VNTU, 2020, 268 p.
3. Yerzhan Mustafa, Selçuk Köse Interfacing Superconductor and Semiconductor Digital Electronics // Applied Physics. – 2026. – (Article). – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.09969>
4. Yerzhan Kudabay, Oliver Kieler Electrical Drive of a Josephson Junction Array using a Cryogenic BiCMOS Pulse Pattern Generator: Towards a Fully Integrated Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer // arXiv:2512.20367. – 2025. – (Article). – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.20367>

Новак Олексій Миколайович – аспірант групи G5-25а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: noyak.oleksii@gmail.com

Кичак Василь Мартинович – д-р техн. наук, завідувач кафедри інфокомунікаційних систем та технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vmkychak@gmail.com

Oleksii Novak – post-graduate student, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: noyak.oleksii@gmail.com

Vasyl Kychak – Dr. Tech. of Sciences, Professor, Head of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia