

Використання надпровідних інтерферометрів в схемах синтезу сигналів

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі наведено аналіз можливостей використання надпровідних квантових інтерферометрів (SQUID) на основі Джозефсонівських переходів у широкосмугових цифрових синтезаторах частот. Проаналізовано динаміку фази в рамках моделі RCSJ та показано фундаментальні переваги квантового підходу. Виділено та обґрунтовано напрямки застосування інтерферометричних структур як активних елементів для детермінованої генерації квантованих імпульсів напруги та для побудови багатеlementних масивів з метою когерентного підсилення їх амплітуди.

Ключові слова: Синтезатори частот, переходи Джозефсона, квантові інтерферометри, генерація квантованих імпульсів, когерентне підсилення, надпровідникові логічні елементи.

Abstract

The paper presents an analysis of the possibilities of using superconducting quantum interferometers (SQUID) based on Josephson junctions in broadband digital frequency synthesizers. The phase dynamics within the RCSJ model is analyzed and the fundamental advantages of the quantum approach are shown. The directions of application of interferometric structures as active elements for deterministic generation of quantized voltage pulses and for construction of multi-element arrays for coherent amplification of the amplitude of quantum pulses are highlighted and substantiated.

Keywords: Frequency synthesizers, Josephson junctions, quantum interferometers, quantized pulse generation, coherent amplification, superconducting logic elements

Вступ

Синтез високочастотних сигналів із наднизьким рівнем фазових шумів є критичною задачею для сучасних радіoeлектронних систем. Традиційна напівпровідникова електроніка наближається до термодинамічної межі спектральної чистоти. Натомість використання надпровідної електроніки, що базується на одноквантових логічних елементах Джозефсона, дозволяє створювати джерела сигналів, стабільність та параметри яких значно перевищують напівпровідникові.

Основним елементом таких систем традиційно виступав одиничний джозефсонівський перехід (ДП). Проте його практичне використання обмежене складнощами керування генерацією та вкрай низьким рівнем вихідної потужності. Заміна одиничних переходів на двоконтактні квантові інтерферометри постійного струму (DC SQUID) відкриває нові шляхи використання надпровідникової логіки, які можна використати для формування сигналу проведення підсилення вихідних сигналів надпровідникових логічних елементів до рівня напівпровідникової схемотехніки.

Мета роботи – обґрунтування використання в синтезаторах частот двоконтактних елементів на основі ефекту Джозефсона у вигляді інтерферометрів для покращення параметрів генерації та обробки сигналів.

Теоретичні засади доцільності використання ефекту Джозефсона

Фундаментальною відмінністю DC SQUID від поодинокого ДП є можливість безконтактного керування його нелінійними властивостями за допомогою зовнішнього магнітного поля. У рамках резистивно-ємнісної моделі (RCSJ) [1] динаміка фази ϕ описується нелінійним диференціальним рівнянням:

$$\frac{\hbar C}{2e} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{\hbar}{2eR} \frac{d\phi}{dt} + I_{c,SQUID}(\phi_{ext}) \sin \phi = I_{bias}(t) + I_n(t), \quad (1)$$

де C та R – ємність та опір шунта відповідно, $I_{bias}(t)$ – струм зміщення, $I_n(t)$ – тепловий струм.

Для симетричного інтерферометра з малою індуктивністю контуру ефективний критичний струм стає періодичною функцією прикладеного магнітного потоку ϕ_{ext} :

$$I_{c,SQUID}(\phi_{ext}) = 2I_{c0} \cdot \cos\left(\frac{\pi \phi_{ext}}{\phi_0}\right), \quad (2)$$

де $\phi_0 = h/2e \approx 2.067 \times 10^{15}$ Wb – квант магнітного потоку.

Здатність гнучко модулювати поріг перемикання структури $I_{c,SQUID}$ є базовим механізмом для обох напрямків застосування.

Генерація квантованих імпульсів за допомогою інтерферометрів

Перший напрямок фокусується на процесі прямого цифрового джозефсонівського синтезу (наприклад, архітектура JAWS). У таких системах широкосмуговий синтез довільної макроскопічної напруги відбувається шляхом прецизійної генерації високочастотної послідовності надкоротких імпульсів.

Коли сумарний струм через інтерферометр перевищує $I_{c,SQUID}$, відбувається фазовий зсув на 2π . Згідно з ефектом Джозефсона, генерується імпульс напруги, інтеграл якого є строго квантованою величиною[2]:

$$\int V(t)dt = \frac{h}{2eR} \int \phi dt = \phi_0 \quad (3)$$

Спектр вихідного сигналу формується за рахунок щільності цих імпульсів у часі, що зазвичай задається методами $\Sigma\Delta$ модуляції високого порядку.

Для досягнення широкої смуги пропускання імпульси накачки доцільно формувати безпосередньо в кріогенній зоні за допомогою швидкої одноквантової логіки (RSFQ). Інтерферометр ідеально інтегрується з RSFQ-ланцюгами. Змінюючи магнітний потік ϕ_{ext} , можна локально знижувати критичний струм інтерферометра до рівня, при якому надходження одиничного імпульсу струму від RSFQ-елемента гарантовано викликає перемикання, дозволяючи реалізувати повністю цифровий контроль синтезу.

В масивах одиничних переходів ширина зони стабільного захоплення частоти, робочого поля струмів, так званих "сходинок Шапіро", обмежена функціями Бесселя. Використання SQUID-ів дозволяє динамічно підлаштовувати параметр $I_{c,SQUID}$, під амплітуду струму накачки $I_{bias}(t)$. Це максимізує розмір квантової сходинок струму, що робить систему значно стійкішою до впливу паразитних параметрів та теплових шумів.

Тремтіння фази (джитер) виникає через тепловий шум, який випадковим чином прискорює або затримує момент переходу фази через бар'єр. Керований магнітний потік ϕ_{ext} дозволяє встановити робочу точку на ділянці з максимальною крутизною $d\phi/dt$, що мінімізує фазову невизначеність при виникненні імпульсу.

Когерентне підсилення амплітуди та узгодження імпедансу

Другий напрямок використання інтерферометрів вирішує проблему узгодження рівнів сигналу надпровідної електроніки. Для широкосмугових синтезаторів критично важливо передати згенерований сигнал у класичний НВЧ-тракт з хвильовим опором 50 Ом без спотворень. Згенерований масив імпульсів індуктивно або гальванічно зв'язується з каскадом підсилення, побудованим на базі багатоелементних масивів SQUID.

При послідовному з'єднанні N ідентичних інтерферометрів, що працюють у резистивному стані, їх вихідні напруги синфазні і амплітуди додаються [3], $V_{out} = N \cdot V_i$. Загальний опір масиву зростає лінійно. Підбираючи кількість елементів N , можна наблизити ефективний вихідний опір до потрібного рівня та спростити узгодження.

Водночас теплові шуми кожного резистивного шунта у моделі Ланжевена є просторово некорельованими: $\langle V_{n,i}(t)V_{n,j}(t') \rangle = 0$ для $i \neq j$. Відповідно, дисперсія шумової напруги масиву зростає лише як N , а середньоквадратичне значення шуму – як $\sqrt{N}$. Це трансформує відношення сигнал/шум (SNR):

$$SNR_{array} = \frac{N \cdot V_{signal}}{\sqrt{N \cdot V_n^2}} = \sqrt{N} \cdot SNR_{single} \quad (4)$$

У той час як регулярні масиви мають періодичну характеристику (що може генерувати паразитні гармоніки при великих амплітудах сигналу), застосування нерегулярних масивів SQIF дозволяє досягти максимальної лінійності. SQIF складається з N контурів із різними площами S_k . Сумарна напруга масиву є суперпозицією фаз[4]:

$$V_{SQIF}(B) \propto \sum_{k=1}^N \cos\left(\phi_0 + \frac{2\pi}{\phi_0} B \sum_{j=1}^k S_j\right) \quad (5)$$

Завдяки деструктивній квантовій інтерференції хвильових функцій при магнітних полях $B \neq 0$, коливання усереднюються до нульового значення. Відгук масиву формує єдиний пік поблизу нульового магнітного поля, $B=0$. На схилах цього піку крутизна перетворення $dV/d\phi$ досягає значень, тисяч В/А, що робить SQIF ідеальним трансімпедансним підсилювачем з низьким коефіцієнтом шумів. Використання SQIF дозволяє трансформувати квантовані пакети напруги ϕ_0 від генераторного масиву у струмовий сигнал без погіршення його спектральної чистоти.

Висновки

Використання двоконтактних квантових інтерферометрів у архітектурі надпровідних цифрових синтезаторів частот дозволяє значно розширювати межі використання традиційних джозефсонівських масивів. Це концептуально реалізується через два паралельні напрямки. Застосування SQUID у ролі базових генераторних комірок (особливо у поєднанні з надпровідною одноквантовою логікою) забезпечує керованість динамікою фазою, розширення робочих діапазонів струмів та радикальну мінімізацію джитера. З іншого боку, застосування багатoelementних масивів SQUID та лінійних SQIF-структур вирішує проблему узгодження та енергетичної ефективності, дозволяючи посилити амплітуду вихідного сигналу та покращити співвідношення сигнал/шум. Сумісне використання цих підходів формує фундаментальний фізичний базис для створення широкосмугових еталонних джерел нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kong T. X., Cruddas J., Tettamanzi G. C. Circuit-theoretic phenomenological model of an electrostatic gate-controlled bi-SQUID. arXiv. 2023. arXiv:2309.01094. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.01094>.
2. Naaman O., White T., Hassan M. A. [et al.]. Modeling flux-quantizing Josephson junction circuits in Keysight ADS. arXiv. 2024. arXiv:2408.07861. URL: <https://arxiv.org/abs/2408.07861>.
3. Galí Labarías M., Muller K., Mitchell E. E. Modeling the transfer function of two-dimensional SQUID and SQIF arrays with thermal noise. Physical Review Applied. 2022. Vol. 17, no. 6. P. 064009. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.064009>
4. Muller K., Mitchell E. E. Effect of junction critical current disorder in superconducting quantum interference filter arrays. Physical Review B. 2024. Vol. 109, no. 5. P. 054507. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.109.054507>.

Новак Олексій Миколайович – аспірант групи G5-25a, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: noyak.aleksey@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 of G5-25a group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: noyak.aleksey@gmail.com

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