

НАДПРОВІДНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ

Вінницький національний технічний університет¹

Анотація

Проведено аналіз надпровідних аналого-цифрових перетворювачів на базі високотемпературної надпровідності та ефекту Джозевсона. Отримано аналітичний вираз для розрахунку залежності розмиття порогової характеристики від параметрів еквівалентної схеми переходу Джозевсона та напруги. Проведені розрахунки показують чутливість АЦП на баз Джозевсона може становити одиниці – десятки долі нА.

Ключові слова: Аналогове-цифрове перетворення, переходи Джозевсона, надпровідні квантові інтерферометри, швидка одноквантова логіка, часове розділення, балансні компаратори, параметр Мак-Камбера.

Abstract

An analysis of superconducting analog-to-digital converters based on high-temperature superconductivity and the Josephson effect has been carried out. An analytical expression has been obtained for calculating the dependence of the threshold characteristic blurring on the parameters of the equivalent circuit of the Josephson junction and voltage. The calculations show that the sensitivity of the ADC on Josephson bases can be units - tenths of a nA.

Keywords: Analog-to-digital conversion, Josephson junctions, superconducting quantum interferometers, fast single-quantum logic, time separation, balanced comparators, McCumber parameter.

Вступ

Цифрове перетворення аналогових сигналів стає наріжним каменем при розробці цифрових приймачів наступного покоління для комерційного та військового зв'язку, радарів і систем радіоелектронної боротьби. Такі приймачі можуть бути перспективними, якщо аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) здатні оцифровувати радіочастотні сигнали безпосередньо з антени з достатньою роздільною здатністю. Такий підхід усуває необхідність аналогового перетворення з пониженням частоти з високих несучих частот на нижні частоти базової смуги. Окрім очевидних апаратних переваг цієї стратегії «цифрового радіочастотного зв'язку», слідують ще більш значні переваги програмного забезпечення. [1,2]

При застосуванні такої технології в діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль реалізація функції АЦП на базі напівпровідників неможлива, тому перспективним є застосування надпровідності та ефекту Джозевсона [3],[4].

Відкриття високотемпературної надпровідності (ВТНП) та ефекту Джозевсона уможливило розробку унікальних електронних пристроїв і систем в сантиметровому, міліметровому і субміліметровому діапазонах хвиль. [3,4]

Метою цієї праці є аналіз сучасних досягнень в галузі побудови надпровідних АЦП та оцінювання їх чутливості.

Аналіз методів побудови напівпровідникових АЦП.

АЦП на базі ВТНП та переходів Джозевсона (ПД) характеризуються рядом переваг у порівнянні з напівпровідниковими. Так мінімальна енергія перемикання пристроїв на базі напівпровідників

становить 10^{-13} Дж/біт, а пристроїв на базі надпровідників становить 10^{-18} Дж/біт, тобто на п'ять порядків нижча. Гранична частота пристроїв на базі ПД може становити сотні ГГц – одиниці ТГц. Такі пристрої характеризуються широкою смугою пропускання, високим динамічним діапазоном або чутливістю до слабких рівнів сигналів, малим рівнем власних шумів. [4]

Надпровідні АЦП можна розділити на дві категорії. Паралельні АЦП з дискретизацією Найквіста та АЦП з передискретизацією. Перші складаються із великої кількості окремих компараторів квантувачів, розташованих паралельно – кожен з яких визначає один рівень квантування. Продуктивність таких АЦП обмежена точністю всіх рівнів квантування. Такі АЦП найкраще використовувати для оцифровування сигналів з широкою смугою пропускання, коли достатньо помірної роздільної здатності до 8дБ. В АЦП з передискретизацією сигнал дискретизується за допомогою одного квантувача. Надпровідний АЦП, як правило, використовує надпровідні квантові інтерферометри постійного струму, як квантувачі, а лічильник перекидання – як оцифровувач. Такі АЦП використовують рух квантів магнітного потоку по контуру і тому ця технологія характеризується надзвичайно високою точністю, оскільки одиниця інформації квантується.

Ідеальний АЦП Найквіста дискретизує сигнал з обмеженою смугою пропускання з частотою дискретизації $f_0 = 2f_n$ і забезпечує точне цифрове представлення цього сигналу з єдиною похибкою, пов'язаною з шумом квантування. Як правило такий АЦП Найквіста складається з великої кількості компараторів, кожен з яких визначає один рівень квантування. На практиці продуктивність такого АЦП обмежується точністю рівнів квантування, які визначаються номіналами резисторів у резистивних колах. [2]

На відміну від АЦП Найквіста в АЦП з передискретизацією сигнал дискретизується на частоті $f_0 \gg 2f_n$ за допомогою одного квантувача. Потім використовуються методи зворотнього зв'язку та цифрова фільтрація для зменшення шуму квантування та розширення динамічного діапазону. АЦП з передискретизацією будується з використанням «дельта» або частіше «сигма-дельта» модулятора.

При застосуванні напівпровідникових технологій більш надійними є сигма-дельта АЦП і в переважній більшості є кращими за дельта АЦП. Частково це пов'язано з тим, що бітові помилки (наприклад через недосконалість інтеграторів), які виникають у дельта-модуляторах, накопичуються та приводять до зміщення вихідного сигналу. У випадку надпровідних технологій наявність близького до ідеального інтегратора в колі зворотнього зв'язку, робить дельта-АЦП практичнішими. Крім того, переваги дельта-АЦП зростають при використанні низькочастотних компонентів.

Оцінювання чутливості надпровідних АЦП

Оскільки надпровідні АЦП забезпечують обробку слабоінтенсивних сигналів, то одним із найважливіших їх параметрів є чутливість і поріг чутливості, який значною мірою визначається впливом теплових і квантових флуктуацій на величину струмів. Чутливість і поріг чутливості можуть бути визначені за допомогою характеристики перетворення. Особливістю компараторів на базі переходів Джозефсона є те, що за відсутності будь-яких флуктуацій така характеристика має пороговий характер, тобто середня напруга на переходах, в залежності від величини, має вигляд ідеальної сходинок. Чутливість компаратора визначається розмиттям цієї характеристики флуктуаціями. Якщо величина розмиття визначається лише термічними флуктуаціями, то його можна розрахувати за виразом

$$\Delta I_k = \left(\frac{KT_0 e}{h I_0} \right)^{2/3} I_k, \quad (1)$$

де I_k - критичний струм для високотемпературного надпровідника, K – стала Больцмана, e – заряд електрона, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h – стала Планка, T – температура, I_0 - струм переходу до Джозевсона.

Проте, у разі застосування для побудови компараторів одноквантових імпульсів вираз (3) використовувати недоцільно, оскільки в цьому випадку швидкість наростання струму збільшується. У відомих працях отримано формули для розрахунку розмиття порогової характеристики, але вони не враховують параметрів фізичної еквівалентної схеми переходу Джозефсона, його геометричних розмірів та швидкості наростання струму.

Розв'язанню цих задач присвячена праця [3], проте отримані в ній залежності не дають можливості дослідити вплив напруги на переході на чутливість та поріг чутливості АЦП. Для врахування

залежності розмиття порогової характеристики від напруги на переході Джозевсона та параметрів його еквівалентної схеми, з урахуванням параметра Мак-Камбера отримано такий вираз:

$$\frac{\Delta I_x}{I_k} = 0.17 \left(\frac{2eKT}{I_k} \right)^{1/2} \left(\frac{aGh}{2eUC} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

де U – напруга на преході, C – електростатична ємність, G – нелінійна провідність переходу Джозевсона, a – швидкість наростання струму

Наближені розрахунки за виразом (2) показують, що чутливість може становити одиниці – десяті долі нА.

Висновок

Проведений аналіз сучасних досягнень в галузі побудови АЦП показує, що використання ВТНП та ПД дає можливість здійснювати пряме аналого-цифрове перетворення сигналів в терагерцовому діапазоні частот з надзвичайно високою роздільною здатністю та чутливістю.

Отримано аналітичний вираз для дослідження залежності чутливості АЦП на базі ПД від параметрів еквівалентної схеми, температури та напруги на переході, що дає можливість визначати оптимальні параметри діелектричного шару, який розділяє надпровідники та типи надпровідників.

Наближені розрахунки показують, що чутливість АЦП на базі переходів Джозевсона може становити одиниці – десяті долі пікоампер.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. SUPERCONDUCTOR ANALOG TO DIGITAL CONVERTER FOR SIGINT APPLICATIONS Amol Inamdar, Deepnarayan Gupta, Timur Filippov, Igor Vernik, Andrei Talalaevski, Anubhav Sahu, and Saad Sarwana HYPRES, Inc. Elmsford, NY Conference Paper · December 2008 DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753449 · Source: IEEE Xplore
2. Alan M. Kadin, and Oleg A. Mukhanov, “Superconducting Analog-to-Digital Converters from: Handbook of Superconductivity,” Characterization and Applications CRC Press, London, no. 07, pp.710-718, Nov. 2023.
3. Shailaj Kumar Shrivastava, and Girijesh Kumar, “Application of High-Tc Uperconducting Josephson Junction Devices,” Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), vol. 6, issue 1, January 2019.
4. В. М. Кичак, М. І. Урсан, О. М. Мельничук «Застосування аналого-цифрових перетворювачів для підвищення ефективності цифрових антенних решіток,» Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2024. № 2, с. 101-108

Кичак Василь Мартинович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційних систем та технологій; e-mail: vmkychak@gmail.com ;

Мельничук Олег Михайлович — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем та технологій; e-mail: oleg9mel9@gmail.com .

Дмитрук Максим Юрійович – студент кафедри інфокомунікаційних систем та технологій; e-mail: rordm279@gmail.com

Kychak Vasyl Martynovych — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Infocommunication Systems and Technologies; e-mail: vmkychak@gmail.com ;

Melnychuk Oleh Mykhailovych — Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Systems and Technologies; e-mail: oleg9mel9@gmail.com .

Dmytruk Maksym Yuriiiovych – Student of the Department of Infocommunication Systems and Technologies; e-mail: rordm279@gmail.com