

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-101-108>

УДК 004.056.523.052(045)

В. М. Кичак¹
М. І. Урсан¹
О. М. Мельничук¹**ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК**¹Вінницький національний університет

Для підвищення ефективності цифрових антенних решіток запропоновано використовувати аналого-цифрові перетворювачі радіосигналів на базі явища надпровідності та ефекту Джозефсона. Проведено аналіз систем цифрового діаграмоутворення. Показано, що застосування запропонованого підходу дасть можливість здійснювати безпосереднє оброблення сигналів на несучих частотах сантиметрових і міліметрових хвиль. Такий підхід дає можливість виключити у приймальному модулі змішувачі частоти, гетеродини та фільтри проміжних частот.

Для побудови надпровідного АЦП запропонована паралельна схема з реалізацією компараторів на базі надпровідникових квантових інтерферометрів. На виході такого АЦП формується цифровий код Грея. У випадку використання такої схеми зі зростанням вхідного сигналу кожний компаратор переходить через декілька порогів і у разі застосування кодів Грея тільки один з вихідних бітів змінюється між послідовними числами. Тому коди Грея є менш чутливими до помилок, які виникають через невеликі розбіжності порогів компаратора. Це дає можливість зменшити ймовірність бітових помилок. В результаті проведеного аналізу показано, що для побудови компараторів доцільно використовувати генератори одноквантових імпульсів на одиничних переходах Джозефсона з безгістерезисною вольт-амперною характеристикою, що дає можливість отримати високу часову роздільну здатність.

Проведено дослідження залежності часової роздільної здатності від параметрів переходу Джозефсона, а саме товщини діелектрика, відносної діелектричної проникливості та щільності критичного струму. Показано, що роздільна здатність може становити одиниці — десяті долі пікосекунди і це дає можливість використовувати такі пристрої для оброблення сигналів на частотах в кілька сотень ГГц. Часова роздільність змінюється зі зміною щільності критичного струму переходу Джозефсона і товщини діелектрика і майже не залежить від відносної діелектричної проникливості.

Проведено оцінювання чутливості компаратора на базі одиничного переходу Джозефсона. Отримано аналітичний вираз, який дає можливість оцінити вплив параметрів еквівалентної схеми переходу Джозефсона, а саме електростатичної ємності, нелінійної провідності та критичного струму на чутливість компаратора. Проведені дослідження показали, що чутливість може становити одиниці нА, що значно перевищує чутливість аналогічних схем на базі напівпровідників.

Ключові слова: переходи Джозефсона, аналого-цифровий перетворювач, компаратор, цифрова антенна решітка, цифрове діаграмоутворення, надпровідниковий квантовий інтерферометр.

Вступ

Особливістю сучасного етапу розвитку інфокомунікаційних систем економічно розвинених країн є широке впровадження нових стандартів цифрової обробки сигналів, які дають можливість суттєво підвищити ефективність спеціальної техніки та озброєнь. Якщо розглядати телекомунікаційні та радіолокаційні системи (РЛС), то тут мова може йти про використання цифрових антенних решіток і цифрового діаграмоутворення. (ЦДУ) [1], [2].

Цифрова антенна решітка (ЦАП) — це сукупність аналого-цифрових каналів зі спільним фазовим центром, в якій формування діаграми спрямованості здійснюється в цифровому вигляді без

застосування фазообертачів [3], [4].

В залежності від діапазону частот, в якому використовується ЦАР, та можливостей елементної бази, аналого-цифрове перетворення (АЦП) сигналів може бути реалізоване на проміжній частоті або безпосередньо на несучій.

Використання обробки на несучій частоті дає можливість виключити операції перетворення частоти, детектування сигналів з виділенням обвідної, що забезпечує зменшення енергетичних затрат, підвищення чутливості приймальної системи та спрощує апаратну реалізацію.

РЛС на базі ЦАР є високоінформативною прийнятною системою, яка здатна сприймати інформацію, що має місце в структурі просторово-часових електромагнітних полів на розкритті антенної решітки та забезпечувати, за мінімальних рівнів втрат, трансформацію цієї інформації в дані про наявність об'єкта та його параметрів в складній завадо-цільовій обстановці [3], [5].

Проте, як зазначено в праці [6] найвужчим місцем сучасних технологій у разі реалізації ЦАР та ЦДУ є недостатньо висока швидкодія АЦП і ЦАП, низька пропускна здатність інтерфейсів.

Наявні АЦП і ЦАП на базі напівпровідникової елементної бази високої точності не можуть забезпечити ефективне перетворення в діапазоні надвисоких частот. Темпи росту продуктивності цифрових сигнальних процесорів (DSP) та матриць логічних елементів, що програмуються (FRGA), суттєво випереджають можливості засобів введення-виведення даних. Частково вирішити ці завдання можна шляхом поліпшення параметрів АЦП [7]—[9].

З огляду на це, *метою роботи* є підвищення швидкодії, часового розрізнення та чутливості АЦП.

Завданням статті є:

- проведення аналізу систем цифрового діаграмоутворення.
- розроблення структури АЦП на базі високотемпературної надпровідності ВТНП та переходів Джозефсона;
- оцінювання чутливості та часового розділення елементів АЦП на базі (ВТНП) та переходів Джозефсона.

1. Аналіз систем цифрового діаграмоутворення

Схемотехніка цифрового діаграмоутворення за своєю суттю суттєво відрізняється від традиційних фазованих антенних решіток, в яких АЦП розміщується лише на сумарних або різницевих каналах приймання. Головною особливістю сучасних схемотехнічних рішень в діапазоні дециметрових і сантиметрових хвиль є оцифрування сигналів безпосередньо на несучій частоті. Варіант такої структури наведено на рис. 1. В цьому випадку АЦП під'єднується безпосередньо до виходів відповідних антен через узгоджувальні підсилювачі, які повинні характеризуватися високим динамічним діапазоном і високою лінійністю.

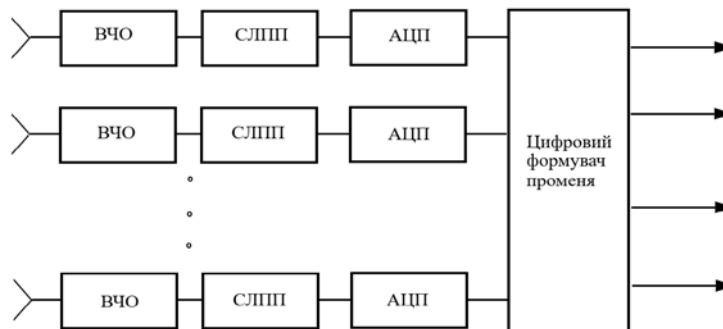


Рис. 1. Приймальний модуль ЦАР: ВЧО — високочастотний обмежувач; СЛПП — суперлінійний підсилювач потужності

Тактовий сигнал на всіх АЦП розподіляється від одного генератора тактових імпульсів з такого розрахунку, щоби АЦП всіх приймальних каналів спрацьовували одночасно. Потім інформація про миттєві амплітудно-фазові розподілення електромагнітного поля на розкритті антенної системи у вигляді відліків АЦП, або їхніх часткових сум, надходить в буферний запам'ятовувальний пристрій. В подальшому діаграмоутворення забезпечується програмним способом за допомогою цифрових програмних процесорів або матриць логічних елементів.

У випадку ЦДУ у разі формування зондувального променя процес змінюється на протилежний. За допомогою цифрових сигнальних процесорів або матриць логічних елементів, що програмують-

ся, синтезується масив цифрових напруг зондувального сигналу, які надходять на цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), з виходу яких, після підсилювача потужності, фільтрації та перенесення за частотою, аналогові сигнали подаються на живлення відповідних антенних випромінювачів [5], [10].

Застосування технології ЦДУ значно покращує якість зв'язку в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль та різко підвищує завадозахищеність РЛС та засобів зв'язку в процесі інтенсивної радіопротидії.

До того ж, із застосуванням ЦДУ збільшується динамічний діапазон приймальних антен. Так у разі синфазного складання сигналів у кожному з каналів середня потужність шумів зростає пропорційно кількості каналів N , а потужність сигналу пропорційна квадрату амплітуди, тобто N^2 . Тому відношення сигнал/шум після ЦДУ зростає в N разів, що підвищує чутливість системи, а відповідно і динамічного діапазону.

Застосування ЦДУ на базових станціях стільникового зв'язку дає можливість суттєво підвищити пропускну та часову роздільну здатність за рахунок застосування одночасного багатопроменового приймання сигналу.

2. Розроблення структури АЦП

Наявні АЦП та ЦАП на основі напівпровідникової елементної бази високої точності не можуть забезпечити ефективне перетворення в діапазоні надвисоких частот. Тому в роботі пропонується для побудови АЦП використовувати надпровідникову елементну базу та ефект Джозефсона. Це дає можливість суттєво знизити енергоспоживання, оскільки мінімальна енергія перемикання для надпровідних цифрових елементів становить 10^{-18} Дж/біт, а для напівпровідникових 10^{-13} Дж/біт, тобто на 5 порядків менша. До того ж, застосування надпровідників та ефекту Джозефсона дає можливість суттєво підвищити швидкодію, оскільки гранична частота для переходів Джозефсона на базі низькотемпературної надпровідності становить кілька сотень ГГц (700 ГГц), а на базі високотемпературної надпровідності — одиниці терагерц [11], [12].

Одною з основних переваг цифрових пристроїв на базі переходів Джозефсона та надпровідності є висока чутливість.

Для побудови надпровідникового АЦП пропонується паралельна схема з реалізацією компараторів на базі надпровідникових квантових інтерферометрів, в яких використовуються переходи Джозефсона та високотемпературна надпровідність.

На рис. 2 показана схема паралельного АЦП, що формує на виході n -розрядний цифровий код Грея. Вхідний сигнал послідовно ділиться навпіл і надходить до лінійки ідентичних компараторів з періодичними порогоми. Вихід першого компаратора є найменш значущим бітом (LSB), а вихід останнього є найзначущим бітом (MSB), із закодованих у кодах Грея.

У випадку багаторозрядного АЦП зі зростанням вхідного сигналу кожний компаратор переходить через декілька порогів і за використання кодів Грея тільки один з вихідних бітів змінюється між послідовними числами. Тому коди Грея є менш чутливими до помилок, які виникають через невеликі розбіжності порогів компаратора, що дає можливість зменшити ймовірність бітових помилок.

Для побудови компараторів можна використовувати схему з генератором Фаріса, яка є перехо-

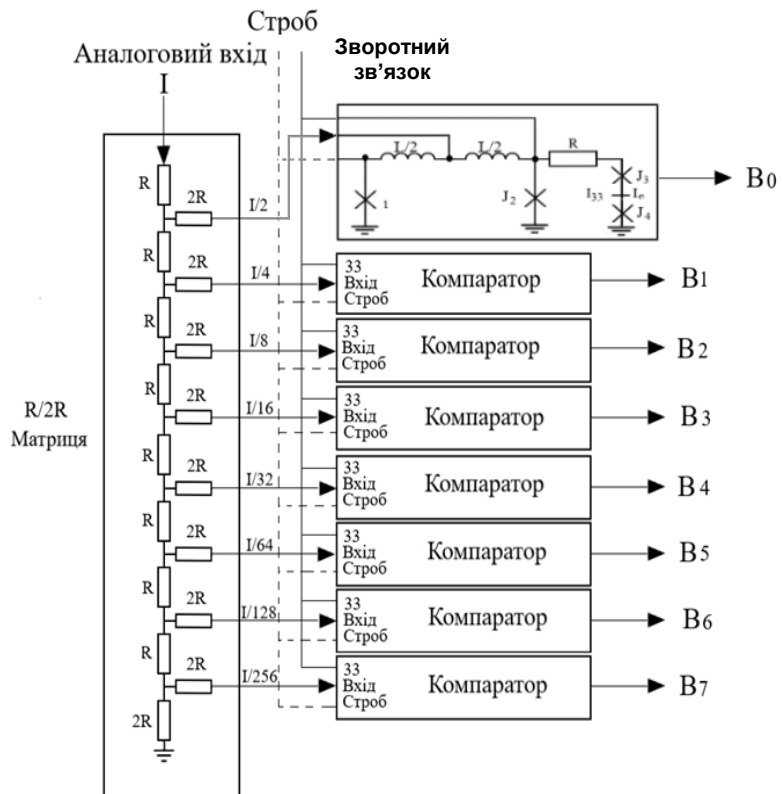


Рис. 2. Структурна схема АЦП

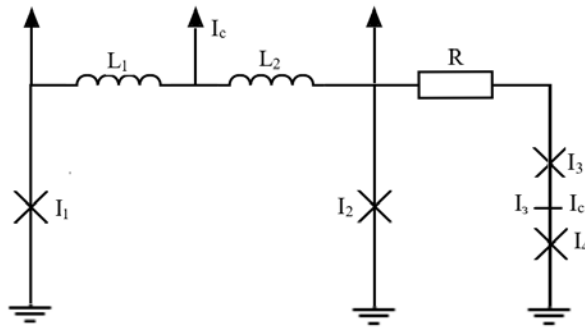


Рис. 3. Компаратор на переходах Джозефсона

імпульс струму подається на компаратор J_4 і складається із сигнальним струмом I_c і струмом зворотного зв'язку I_{33} . Якщо цей струм перевищує критичні струми, то перехід Джозефсона перемикається в резистивний стан і відповідно змінюється струм зворотного зв'язку.

У низці робіт щодо використання переходів Джозефсона для побудови компараторів, показано, що зі збільшенням щільності критичного струму використання схеми Фаріса з метою створення високочутливих і швидкодійних перетворювачів недоцільно, оскільки погіршуються параметри вихідних імпульсів. Перехід до схем з одноквантовими імпульсами разом з використанням балансного принципу побудови компараторів дає можливість отримувати кращі значення часової роздільної здатності та вищу чутливість.

Одним з важливих напрямків поліпшення параметрів надвисокочастотних АЦП є підвищення їхньої стійкості до різного роду шумів і флуктуацій температури. Для цього запропоновано використовувати напівпровідникові перетворювачі на базі тунельних діодів.

У випадку використання балансного принципу побудови компараторів на базі переходів Джозефсона також виключаються спотворення, пов'язанні з не ідеальністю керувальних імпульсів.

Проведений в низці робіт аналіз динаміки балансних компараторів і оцінювання часової роздільної здатності показує, що для побудови компараторів доцільно використовувати генератори одноквантових імпульсів на одиничних джозефсонівських переходах з безгістерезисною вольт-амперною характеристикою, що дає можливість отримати величину часової роздільної здатності на рівні одиниць пікосекунди, і навіть менше 1, водночас балансні схеми забезпечують роздільну здатність на рівні кількох десятків пікосекунди.

Проведено оцінювання часової роздільної здатності компараторів на базі одиничних безгістерезисних джозефсонівських переходів.

3. Оцінювання часової роздільної здатності та чутливості

Як відомо, мінімальне значення часової роздільної здатності залежить від характеристичної напруги і його можна розрахувати за виразом [3]

$$\delta t_{\min} = \frac{5h}{2eU_k},$$

де U_k — характеристична напруга, яка може становити десяті долі або одиниці мВ.

Для реальних значень характеристичної напруги близько 2 мВ можна досягнути часового розділення близько 1 пс. Аналіз перехідних характеристик для безгістерезисних балансних компараторів показує, що часову роздільну здатність можна розрахувати за таким виразом:

$$\delta t = 0,64 \frac{\Phi_0}{2\pi I_k R_H}, \quad (1)$$

де $\Phi_0 = 2,07$ мВ пс — квант магнітного потоку; $I_k R_H = U_k$ — характеристична напруга.

Для реальних значень характеристичної напруги $U_k = 2$ мВ величина часового розділення становить десяті долі пікосекунди.

Для характеристичної напруги, яка характерна для високотемпературних надпровідників $U_k = (0,6 \dots 0,9)$ мВ часова роздільна здатність становить 0,26 пс, якщо $U_k = 0,8$ мВ.

Варто зазначити, що часова роздільна здатність залежить не лише від характеристичної напруги

ги, але і інших параметрів надпровідника таких, як щільність критичного струму, параметрів діелектрика ϵ , і його товщини d , критичного струму I_k і струму переходу I_c .

В цьому випадку вираз для оцінювання часової роздільної здатності має вигляд

$$\delta\tau = \frac{1}{\left(1 - \frac{I_c}{I_k}\right)^{1/2} \left(\frac{2eI_c d}{\hbar\epsilon\epsilon_0}\right)^{1/2}}, \quad (2)$$

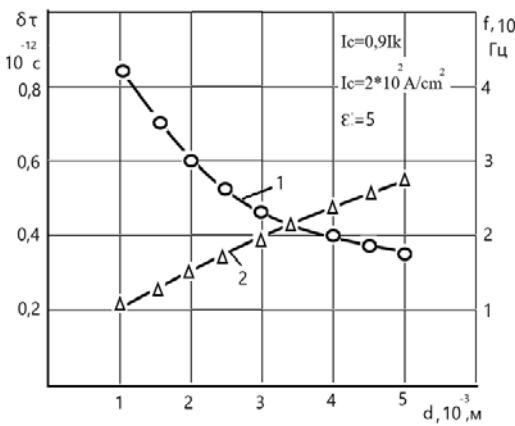


Рис. 4. Залежність від товщини діелектрика: 1 — часової роздільної здатності; 2 — допустимої частоти вхідного сигналу

значення частоти вхідного сигналу за виразом

$$f_c = \frac{1}{\delta\tau}.$$

Проведені розрахунки показують, що частота вхідного сигналу може становити одиниці терагерц. (рис. 4), що дає можливість суттєво підвищити швидкодію АЦП, які використовують компаратори на базі високотемпературних надпровідників і переходів Джозефсона.

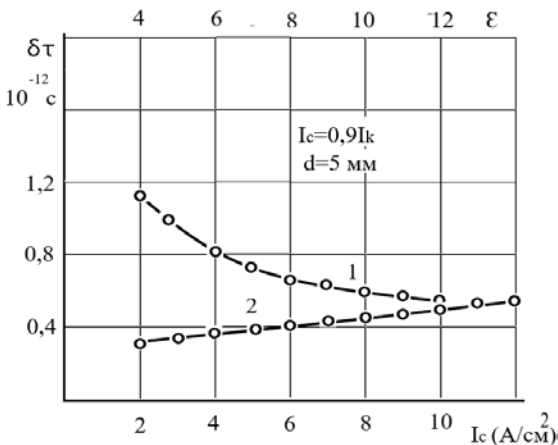


Рис. 5. Залежність часової роздільної здатності від: 1 — щільності струму; 2 — відносної діелектричної проникності

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

де d — товщина діелектричного шару між надпровідниками; j_c — щільність критичного струму, яка для високотемпературних надпровідників на базі YBaCuO за температури 90...70 °K може становити $(2...5) \cdot 10^5 \frac{A}{cm^2}$, для низькотемпературних надпровідників на базі ніобію Ni — $(2...5) \cdot 10^3 \frac{A}{cm^2}$; ϵ — відносна діелектрична проникність діелектрика.

З урахуванням виразу (2) проведені дослідження залежності часової роздільної здатності від товщини діелектрика (рис. 4). Як видно з поданих графіків, часова роздільна здатність зі збільшенням товщини діелектрика поліпшується.

Використовуючи отримані значення для часової роздільної здатності, можна розрахувати максимальні

Проведені дослідження залежності часової роздільної здатності від щільності критичного струму надпровідника та величини відносної діелектричної проникності діелектрика, розташованого між надпровідниками, для випадку високотемпературних надпровідників (рис. 5). Аналіз отриманих результатів, показує, що зі зміною відносної діелектричної проникності від 4 до 9, часова роздільна здатність змінюється приблизно на 30%, тому незначні відхилення діелектричної проникності суттєво не впливають на величину часової роздільної здатності.

Оскільки АЦП на базі переходів Джозефсона забезпечують оброблення слабоінтенсивних сигналів, то важливим параметром компараторів, які використовуються для їхньої побудови є поріг чутливості, який значною мірою визначається впливом теплових і квантових флуктуацій на величину

$$\Delta I_k = \left(\frac{KT2e}{\hbar I_0} \right)^{2/3} I_k. \quad (3)$$

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.

З урахуванням цього розмиття порогової характеристики можна розрахувати за виразом [13].

$$\Delta I_k = 0,17 \left(\frac{2eKT}{\hbar I_0} \right)^{1/2} I_k \left(\frac{Ga}{\omega C} \right)^{3/8}, \quad (4)$$

де a — швидкість наростання струму; G — нелінійна провідність переходу Джозефсона; C — електростатична ємність переходу.

Варто зазначити, що у разі застосування одноквантових імпульсів швидкість наростання струму може бути більшою величини

$$a > \left(\frac{3\gamma}{2} \right)^{3/2}.$$

Аналіз виразу (4) показує, що величина розмиття порогової характеристики зростає зі збільшенням критичного струму, нелінійної провідності та зменшується з ростом електростатичної ємності ПД. На величину розмиття впливає швидкість наростання струму, величину якої можна розрахувати за наближеним виразом

$$a = \frac{2}{\pi}. \quad (5)$$

У загальному випадку, чутливість компаратора, а відповідно і АЦП на його базі, прямо пропорційна розмиттю порогової характеристики ΔI_k

$$\delta I_k = \frac{\Delta I_k}{\sqrt{N}}, \quad (6)$$

де N — фактор усереднення, пов'язаний зі статистичним характером вимірювання.

Він визначається, як кількість імпульсів, які використовуються для вимірювання одного часового відліку характеристики і його можна розрахувати за виразом

$$N = \frac{t}{\delta t} \tau_{max} f, \quad (7)$$

де t — час вимірювання імпульсу; τ_{max} — максимальна довжина імпульсу, яка визначається як $\tau_{max} \leq f^{-1}$; f — частота повторення імпульсів.

Підставивши (7) і (4) в (6), отримаємо

$$\delta I_k = 0,17 \left(\frac{2eKT}{\hbar I_0} \right)^{1/2} \left(\frac{Ga}{\omega C} \right)^{3/8} I_k / \left(\frac{t}{\delta t} \tau_{max} f \right)^{1/2}, \quad (8)$$

де $\omega = \frac{2g}{\hbar} \cdot \frac{I_0}{G}$ — кругова частота Джозефсона, яка відповідає частоті генерації напруги у разі протікання через резистор з провідністю G максимального струму стаціонарного ефекту Джозефсона.

Розрахунки, виконанні за допомогою наведеного виразу, показують, що чутливість компаратора, а відповідно і АЦП на його базі може становити декілька нА.

Для розрахунку використовувались такі вихідні дані:

$$G = 10 \text{ см}; \quad I_k = 10^{-5} \text{ А}; \quad \tau_{max} = f^{-1}; \quad t = 10^{-9} \text{ с}; \quad \delta t = 0,3 \cdot 10^{-12} \text{ с}; \\ T = 100 \text{ К} \quad I_0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ А}.$$

Для таких вихідних даних чутливість компаратора, а відповідно і АЦП становить близько $7,4 \cdot 10^{-9}$ А.

Наведений вираз (8) дає можливість оцінити вплив параметрів еквівалентної схеми переходу на чутливість компаратора.

Висновки

1. Запропоновано для підвищення ефективності цифрових антенних решіток, використовувати аналого-цифрові перетворювачі, основні елементи, яких виготовляються на базі переходів Джозефсона та явища високотемпературної надпровідності.

2. Проведені дослідження залежності часової роздільної здатності від параметрів переходу Джозефсона, а саме товщини діелектрика, його відносної діелектричної проникності та щільності критичного струму. Показано, що часова роздільна здатність може становити десятки долі — одиниці пікосекунди і це дає можливість використовувати такі пристрої для оброблення сигналів на частотах у кілька сотень ГГц.

3. Проведене оцінювання чутливості компаратора на базі переходів Джозефсона, як основного елемента АЦП, показало, що чутливість може становити одиниці нА, що значно краще порівняно з аналогічними напівпровідниковими елементами. Отримані аналітичні залежності дають можливість оцінити вплив параметрів еквівалентної схеми переходу Джозефсона на чутливість компаратора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V. I. Slynar, "Origins of the Digital Antenna Array Theory," *International Conference on Antenna Theory and Technigues*, Kyiv, Ukraine, 24-27 May, 2017, pp. 199-201.
- [2] В. І. Слюсар, *Адаптивна антенна решітка*. Київ, Україна, 2017.
- [3] В. А. Варюхин, *Основи теорії багатоканального аналізу*. Київ, Україна: Наукова думка, 2015, с. 168.
- [4] В. І. Слюсар, і М. В. Бондаренко, «Потенційна точність пеленгації в цифрових антенних решітках в умовах джиттеру АЦП,» *Військово-технічний збірник*, № 3, 2010.
- [5] В. І. Слюсар, «Цифрові решітки: аспекти розвитку,» *Спеціальна техніка і озброєння*, № 1, 2, с. 17-23, 2002.
- [6] В. І. Слюсар, «Швидкодіючі АЦП. Досягнення і перспективи розвитку,» *Радіоелектроніка*, т. 43, № 3, 2006.
- [7] Shailaj Kumar Shrivastava, and Girijesh Kumar, "Application of High-T_c Uperconducting Josephson Junction Devices," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, vol. 6, issue 1, January 2019.
- [8] 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.
- [9] Oleg A. Mukhanov, Deepnarayan Gupta, Alan M. Kadin, and Vasili K. Semenov, "Superconductor Analog-to-Digital Converters," *Proceedins of the IEEE*, vol. 92, no. 10, pp.1564-1585, October 2004.
- [10] А. В. Булашенко, «Принцип формування променя інтелектуальних антен,» *Вісник Сум ДУ. Серія технічні науки*, № 11, с. 111-118, 2010.
- [11] М. М. Буднік, Ю. Р. Пустовіт, і О. В. Прокопенко, *Надпровідникова електроніка.*, навч. пос. Київ, 2020, 205 с.
- [12] О. Р. Яненко, К. Л. Шевченко, and V. М. Кучак, *Methods and means of formation, processing and use of low-intensity electromagnetic signals*, monogr. Vinnytsya, Ukraine: VNTU, 2020, 268 p.
- [13] V. М. Кучак, М. Vasylykivskyi, V. Kuchak, and M. D. Huz, "Pulse-code modulator for processing of weakly intense signals in the terahertz frequency range," *UkrMiCo'2018*, 10-14 September 2018. Odessa, Ukraine: Odessa National Academy of Telecommunication (ONAT), 2018.

Рекомендована кафедрою інфокомунікаційних систем та технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.02.2024

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

Урсан Максим Іванович — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем та технологій, e-mail: ТКТ17MSUrsan@gmail.com ;

Мельничук Олег Михайлович — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем та технологій; e-mail: oleg9me19@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет. Вінниця

V. M. Kychak¹
M. I. Ursan¹
O. M. Melnychuk¹

Using Analog-to-Digital Converters to Increase the Efficiency of Digital Antenna Arrays

¹Vinnitsia National Technical University

Analog-to-digital converters of radio signals, which are based on the phenomenon of superconductivity and the Josephson effect, are proposed to use in order to increase the efficiency of digital antenna arrays. Digital beamforming systems were analysed. Application of the proposed approach was shown to promote processing signals directly at carrier frequencies in the SHF and EHF bands. This approach allows to exclude frequency mixers, local oscillators and intermediate frequency filters from a receiving module.

A parallel scheme with comparators on superconducting quantum interferometers is proposed for constructing a superconducting ADC. A digital Gray code is formed at the output of the ADC. The proposed scheme being utilizing, when the input signal increases, each comparator passes through several thresholds, and if Gray codes are applied, only one of the output bits changes between consecutive numbers. Therefore, Gray codes are less sensitive to errors that arise due to small differences in comparator's thresholds. This promotes reduction of the bit error probability. As an outcome the performed analysis, it was shown that generators of single-quantum pulses on single Josephson junction with a hysteresis-free current-voltage characteristic can be used for constructing comparators, that provides obtaining a high time resolution.

The dependence of time resolution on Josephson junction parameters, namely dielectric thickness, relative dielectric permeability and critical current density, was investigated. The resolution was shown to be equal units — tenths of a ns, and this allows using such devices for signal processing at frequencies of several hundred GHz. The time resolution changes with changes in the critical current density of a Josephson junction and in the dielectric thickness and it is almost independent on the relative dielectric permittivity.

The sensitivity of the comparator on a single Josephson junction was evaluated. An analytical expression was obtained, it can be applied to estimate how parameters of the Josephson junction equivalent circuit, namely, electrostatic capacity, nonlinear conductivity, and critical current impact on the sensitivity of the comparator. The conducted studies showed that the sensitivity can be units of nA, which exceeds significantly the sensitivity of similar circuits based on semiconductors.

Keywords: Josephson junction, analog-to-digital converter, comparator, digital antenna array, digital beamforming, superconducting quantum interference device.

Kychak Vasyly M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: vmkychak@gmail.com ;

Ursan Maksym I. — Post-Graduate Student of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: TKT17MSUrsan@gmail.com ;

Melnychuk Oleh M. — Post-Graduate Student of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: oleg9mel9@gmail.com