

ІВЛЄВ АНТОННаціональний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: dk02.ivlev@iit.kpi.ua**КОРНЄВ ВОЛОДИМИР**Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0001-7608-6726>
e-mail: v.kornev@kpi.ua**БОНДАРЕНКО ВІКТОР**Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>
e-mail: vicbondarenko@gmail.com**БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ**Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>
e-mail: nalbondarenko@gmail.com

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ПРИЙМАЧІВ

У зв'язку з ситуацією в державі, актуальним є питання наявності пристроїв для тестування приймальних пристроїв, антен. Загалом приймачі працюють на високих частотах до 8 ГГц, тому тестування відбуватиметься із застосуванням генератора синусоїдальних сигналів, який має генерувати частоту від 62,5 МГц до 8 ГГц. Аналіз ринку показує, що такі генератори в основному існують для лабораторних умов, доволі дорогі та громіздкі [1]. Дана стаття присвячена розробці компактного пристрою, призначеного для генерації сигналів високої частоти, працюючого в польових умовах і дешевого за аналогічні пристрої. Найкращім рішенням для генерування сигналів високої частоти є компактний генератор, керований напругою (ГКН), реалізований на готових мікросхемах. ГКН працює за принципом коливального контуру LC, в якому можна задавати частоту, змінюючи ємність конденсатора або індуктивність котушки. Паралельно до конденсатора підключають варікап – конденсатор змінної ємності, яка залежить від прикладеної напруги. ГКН досить нестабільні та можуть змінювати частоту в залежності від різних факторів, наприклад: температури, тиску, вологості. Тому до генератора підключають систему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) [2], в якості якої обрано мікросхему з вбудованим ФАПЧ. Такі мікросхеми програмується зазвичай за послідовним протоколом SPI. Різні приймачі, які тестуватимуться створеним пристроєм, мають різну чутливість, тому перед високочастотним виходом додається атенюатор, який має бути змінним та пригнічувати сигнал від 0 до 31,5 дБм. Для керування ФАПЧ та атенюатором обраний надійний та достатньо розповсюджений мікроконтролер STM32, який має необхідний функціонал. Проведено моделювання мікрополоскової лінії у програмному середовищі CST Studio для заданої частоти. В подальшому передбачено удосконалення пристрою в частині контролю генеруванням високочастотних імпульсів із застосуванням перемикачів та вдосконалення програмного забезпечення для програмного управління генератором.

Ключові слова: генератор, керований напругою (ГКН), мікрополоскова лінія, ФАПЧ, атенюатор, мікроконтролер STM32, CST Studio.

IVLIEV_ANTON, KORNIEV_VOLODYMYR, BONDARENKO_VIKTOR, BONDARENKO_NATALIYA
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DEVICE FOR TESTING RECEIVERS

Due to the current situation in the country, the issue of availability of devices for testing receivers is becoming urgent. In general, receivers operate at high frequencies up to 8GHz, so testing will be done using a sine wave generator that should generate a frequency between 62.5 MHz and 8 GHz. Market analysis shows that such generators mainly exist for laboratory conditions, are quite expensive and bulky. This article is devoted to the development of a compact device of high quality, designed for the generation of high-frequency signals, operating in field conditions and cheaper than similar devices. The best solution for generating high-frequency signals is a compact voltage-controlled generator (VCG) implemented on ready-made microcircuits. VCG works on the principle of an oscillating LC circuit, in which the frequency can be set by changing the capacitor capacity or the coil inductance. In parallel with the capacitor, a varicap is connected - a capacitor of variable capacity, which is controlled by voltage. VCGs are quite unstable and can change their frequency depending on various factors, for example: temperature, pressure, humidity. Therefore, a PLL (Phase Locked Loop) system is connected to the generator, as a microcircuit with a built-in PLL. Such microcircuits are usually programmed using the SPI serial protocol. The different receivers to be tested by the designed device have different sensitivities, so an attenuator is added before the high-frequency output, which should be variable and suppress the signal from 0 to 31.5 dBm. To control the PLL and the attenuator, a reliable and widely used STM32 microcontroller, which has the necessary functionality, is chosen. The microstrip line was simulated in the CST Studio software environment for a given frequency. In the future, it is expected to improve the device in the part of controlling the generation of high-frequency pulses using switches and improving the software for controlling the generator.

Keywords: voltage-controlled generator (VCG), microstrip line, PLL, attenuator, STM32 microcontroller, CST Studio.

Вступ

В статті розглянуто основні етапи розробки і випробування високочастотної складової пристрою для тестування приймачів, а також шляхи вирішення, пов'язаних з цим основних завдань. Різноманіття таких

пристроїв виражається в їх конструкції, параметрах та фізичних розмірах, що визначає їх ефективність при застосуванні в різних областях. Зазначений пристрій забезпечує генерацію сигналу, який застосовують для тестування компонентів, включаючи високочастотні модулі та фільтри. Форма сигналу може мати багато варіацій, включаючи періодичні та неперіодичні функції, такі як синусоїда, меандр, пилкоподібний, трикутний та прямокутний сигнали. Таким чином, важливою частиною пристрою є генератор і від того, наскільки він є стабільним і точним, залежить чи зможе приймач виявити переданий сигнал та вірно його прийняти.

Наявні генератори високої частоти для тестування приймальних пристроїв призначені здебільшого для роботи в лабораторних умовах, до того ж працювати з ними може людина, яка є фахівцем у даній області. Наприклад генератори від компанії Rohde & Schwarz мають усі необхідні функції, але створені для лабораторних умов, а їх ціна сягає десятків тисяч доларів [1]. Лінійка компактних генераторів для подорожей від компанії Signal Hound побудована на системі прямого цифрового синтезу (DDS) [3], яка більш актуальна на частотах до 30 МГц, а на більш високих частотах утворюється багато гармонік, які заважають коректному тестуванню.

Завдання, яке вирішується в даній роботі полягає в розробці пристрою для тестування приймачів на базі генератора синусоїдальних коливань високої частоти від 62,5 МГц до 8 ГГц з пригніченням сигналу до -31,5 дБм. Пристрій має відзначитися високою надійністю для використання у польових умовах із живленням від ноутбуку (5 В) або від АСК через D-SUB роз'єм, мати малогабаритний корпус і захист від пилу та вологи. Керування пристроєм здійснюється із застосуванням комп'ютера або автоматичної системи контролю.

Принцип роботи генератора, керованого напругою, з вбудованим фазовим автопідстроюванням частоти

У якості генератора синусоїдальних сигналів високої частоти обрано мікросхему ADF4372 [4] від виробника Analog devices, оскільки до неї є протестована відлагоджувальна плата. Аналоги ADF4372 від інших виробників менш надійні. Функціональна діаграма мікросхеми ADF4372 наведена на рис.1. ADF4372 містить генератор, керований напругою (ГКН), та систему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), яка складається з дільника частоти, детектора фази та контурного фільтра. На діаграмі VCO CORE представляє собою ГКН. Напряга подається зі входу VTUNE. До CPOUT та VTUNE підключено петлевий фільтр. Петлевий фільтр перетворюватиме імпульси у певний рівень напруги для ГКН.

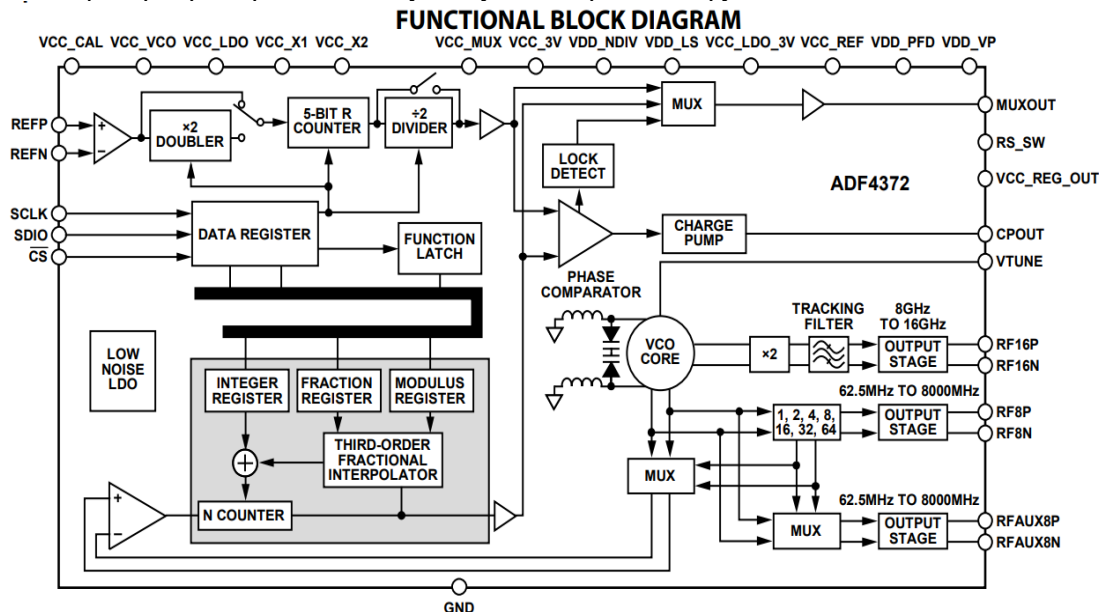


Рис. 1. Функціональна діаграма мікросхеми ADF4372 [4]

На виході CPOUT отримуємо імпульси з фазового компаратора (PHASE COMPARATOR), які свідчать про різницю поділеної вихідної частоти пристрою та опорної частоти. Через вихід MUXOUT можна відслідковувати роботу пристрою, а саме блокування фазового компаратора, значення поділеної вихідної частоти. На входи REFP та REFN подається сигнал опорної частоти, джерелом якого є кварцевий резонатор з частотою 100 МГц. Схема підключення скопійована з відлагоджувальної плати [5]. Для більш точного налагодження частоти вихідного сигналу, є можливість використати підхід, відповідно до якого опорну частоту з генератора множать на 2, пропускають через 5 бітний лічильник і потім ділять на 2 (рис.2). Тестування приймача здійснюватиметься на частоті 8 ГГц. Для генерування сигналу даної частоти потрібна опорна частота у 100 МГц, тому помножувач, дільник та лічильник програмно відключені.

На вхід фазового компаратора поступає сигнал генератора, керованого напругою (VCO CORE), після проходження через прескалер та лічильник зі значенням N , та сигнал опорної частоти. Значення N розраховане згідно виразу (1). Після розрахунку опорної частоти та лічильника зі значенням N , отримано

потрібну частоту. Фазовий компаратор керує ГКН-ом із застосуванням імпульсів, пропущених через петлевий фільтр, до поки опорна частота не буде дорівнювати вихідній частоті, пропущеній через лічильник.

Прораховано, які значення треба записати у лічильник та дільник для досягнення частоти у 8 ГГц. Дану частоту легко згенерувати, оскільки вона кратна 1 ГГц і значення N є цілим.

$$N = \frac{Prescaler \times F_{CBЧ}}{F_{Опорна}}, \tag{1}$$

де N – значення, на яке ділиться вихідна частота з ГКН (VCO CORE) після prescaler, який використовується для зменшення високочастотного сигналу до меншої частоти;

Prescaler – дробне значення, на яке множиться частота після ГКН (VCO CORE), при цьому є два варіанти: $\frac{4}{5}$ та $\frac{8}{9}$; обрано $\frac{4}{5}$ (значення за замовчуванням);

$F_{CBЧ}$ – значення частоти, яку генерує ГКН (VCO CORE);

$F_{Опорна}$ – значення опорної частоти від кварцевого резонатора після проходження дільника, лічильника та множника.

Таким чином,

$$N = \frac{\frac{4}{5} \times 8000 \text{ МГц}}{100 \text{ МГц}} = 64. \tag{2}$$

В результаті розрахунків визначено, що опорна частота для досягнення вихідної частоти 8 ГГц не змінюється, та дорівнює частоті кварцевого резонатора 100 МГц. Тому вміст регістрів мікросхеми не змінюється, а залишається за замовчуванням. Предільник за замовчуванням має значення $\frac{4}{5}$, тому вміст регістру, який відповідає за предільник, не змінюється.

Два регістри, десятий та одинадцятий, мікросхеми ADF4372 (рис.2) відповідають за значення N . За замовчуванням N дорівнює 0x32, чи у десятковому вигляді 50. Виходячи з розрахунків, вміст даного регістра треба змінити з 50 на 64. Таким чином, для досягнення частоти у 8 ГГц, треба у регістр за адресою 0x10 записати значення 0x40 (значення наведені у шістнадцятковому форматі). Запис до даного регістру проводиться за послідовним інтерфейсом SPI.

Address: 0x10, Default: 0x32, Name: REG0010

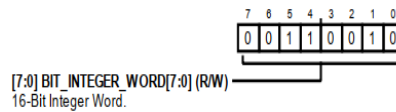


Table 16. Bit Descriptions for REG0010

Bit(s)	Bit Name	Description	Default	Access
[7:0]	BIT_INTEGER_WORD[7:0]	16-Bit Integer Word. Sets the integer value of N. Updates to the PLL N counter, including FRAC1, FRAC2, and MOD2, are double buffered by this bitfield.	0x32	R/W

Address: 0x11, Default: 0x00, Name: REG0011

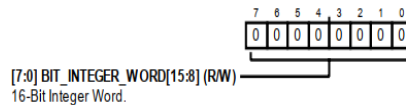


Table 17. Bit Descriptions for REG0011

Bit(s)	Bit Name	Description	Default	Access
[7:0]	BIT_INTEGER_WORD[15:8]	16-Bit Integer Word. Sets the integer value of N.	0x0	R/W

Рис. 2. Регістри 10 та 11 відповідають за ціле значення N [4]

Принцип роботи атенюатора зі змінним рівнем пригнічення сигналу

Атенюатор обрано від Analog Devices, оскільки у пристрої вже є 3 мікросхеми від даного виробника [2]. Серед наявних атенюаторів обраний ADRF5730 тому, що він має діапазон пригнічення від 0 до 31,5 дБм, що чітко відповідає завданню. Даний атенюатор керується програмним методом, на його входи подаються логічні рівні, які відображають, на який рівень пригнічення запрограмовано атенюатор.

На спрощеній електричній схемі атенюатора (рис. 3) показано, що у середині мікросхеми розташовано 6 атенюаторів з рівнями придушення у 0,5 дБм, 1 дБм, 2 дБм, 4 дБм, 8 дБм та 16 дБм. Вбудовані атенюатори вмикають та вимикають в залежності від того, в яких положеннях є тригери мікросхеми ADRF5730.

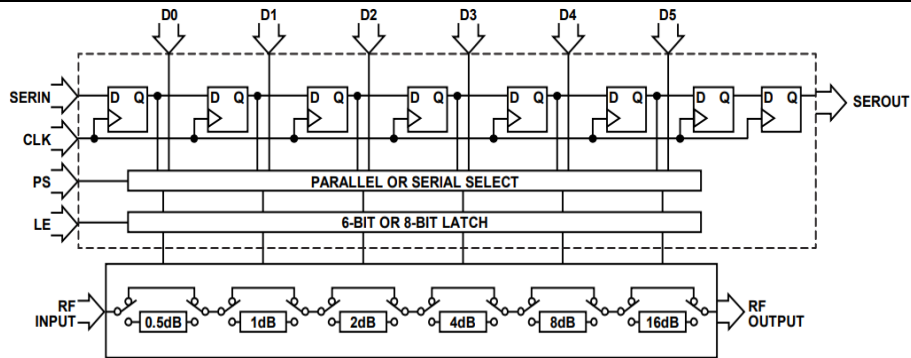


Рис. 3. Спрощена електрична схема атенюатора [6]

Для отримання заданого пригнічення, на рис.4 наведені рівні сигналу, які мають бути на тригерах.

Digital Control Input'						Attenuation State (dB)
D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Low	Low	Low	Low	Low	Low	0 (reference)
Low	Low	Low	Low	Low	High	0.5
Low	Low	Low	Low	High	Low	1.0
Low	Low	Low	High	Low	Low	2.0
Low	Low	High	Low	Low	Low	4.0
Low	High	Low	Low	Low	Low	8.0
High	Low	Low	Low	Low	Low	16.0
High	High	High	High	High	High	31.5

Рис. 4. Залежність пригнічення від рівнів сигналу на тригерах ADRF5730 [6]

Для програмування атенюатора використовуємо паралельний інтерфейс та подаємо потрібні логічні рівні на входи.

Розрахунок мікрополоскової лінії

На друкованій платі пристрою мікрополоскова лінія виходить з генератора, проходить через атенюатор на роз'єм, як зображено на рис.5. Роз'єм 32K243-40ML5 від виробника ROSENBERGER є доволі поширеним і розрахований до частоти 18 ГГц, що задовольняє характеристикам пристрою. Існує достатньо роз'ємів, які також підійдуть для даної розробки, але 32K243-40ML5 є перевіреним рішенням, що використовується у відлагоджувальній платі генератора. Роз'єм закріплюється на плату гвинтами, що спрощує монтаж. Наведена конфігурація має запас по частоті, тому, за необхідності, є можливість швидко перепроектувати плату для частот від 8 ГГц до 16 ГГц і зібрати такий генератор з наявних компонентів.

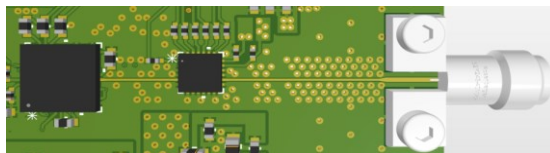


Рис. 5. Вигляд мікрополоскової лінії на платі

Проведено розрахунок мікрополоскової лінії у CST Studio [4], із застосуванням вбудованого калькулятора (рис. 6). Генератор створює сигнал в діапазоні частот від 62,5 МГц до 8 ГГц, у калькулятор записуємо центральну частоту – 4 ГГц, на якій маємо характеристики. Обрано матеріал діелектрика Core S7136H, який часто використовують у НВЧ техніці. Висота діелектрика є сталюю: 0.102 мм. Даний матеріал має діелектричну проникність 3.42 Ф/м. Для досягнення опору 50 Ом змінюємо ширину полоски (W) та відстань від полоски до землі (g). Отримане значення 50.11 Ом є задовільним, з огляду на те, що виробництво не забезпечує більшу точність.

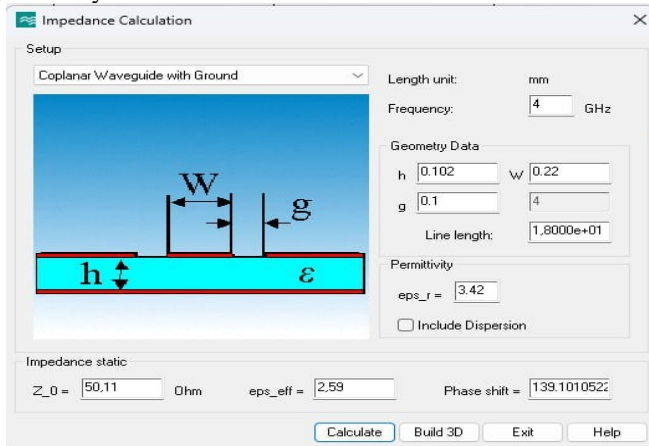


Рис. 6. Розрахунок мікрополоскової лінії у CST Studio

Генеруємо мікрополоскову лінію для даної частоти. Після занесення усіх параметрів моделюємо її для діапазону частот до 8 ГГц і аналізуємо отримані характеристики. Результат моделювання наведено на рис. 7. Як видно з графіку, втрати на мікрополосковій лінії прямують до нуля на всьому діапазоні частот.

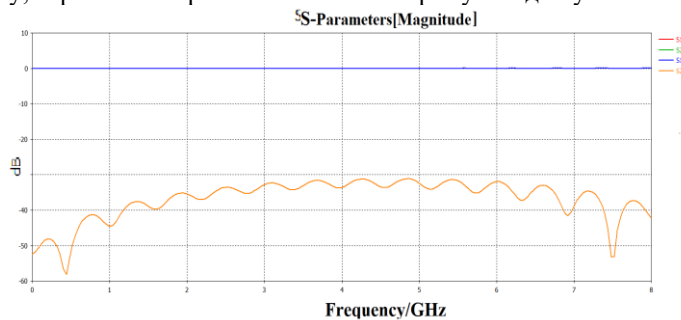


Рис. 7. Графік S-Parameters

Висотою полоски у розрахунках знехтували тому, що струм розповсюджується по поверхні провідника і товщина у 18 мікрон не вплине на результат [7].

Висновки

Основними компонентами розробленого пристрою є генератор, керований напругою, з вбудованим ФАПЧ (мікросхема ADF4372), атенюатор ADRF5730 зі змінним пригніченням сигналу та мікроконтролер STM32. Керування пристроєм відбувається із застосуванням комп'ютера або автоматичної системи контролю (АСК). У зв'язку з тим, що мікроконтролер STM32 не приймає дані USB формату, доданий USB – UART трансивер для перетворення даних у UART формат. Для керування генератором із застосуванням АСК доданий D-SUB роз'єм та CAN – FDCAN трансивер. Використання трансиверу також зумовлено тим, що STM32 безпосередньо не підтримує CAN шину. Живлення пристрою від комп'ютера (5 В). Інший варіант, живлення поступає від АСК через D-SUB.

Приймач отримує сигнал малої амплітуди, яка залежить від відстані знаходження передавальної станції. Тому, щоб емулювати потрібну відстань, після ГКН встановлено атенюатор з певним рівнем пригнічення сигналу. Розглянуто принцип роботи атенюатора ADRF5730, який має рівень пригнічення від 0 до 31,5 дБм, та керується програмним методом. Для програмування атенюатора застосовано паралельний інтерфейс. Визначено та наведено залежність рівня пригнічення від рівнів сигналу на тригерах ADRF5730.

За результатами розрахунку та моделювання мікрополоскової лінії, виконаного засобами CST Studio, отримані значення S-параметрів, які свідчать про низькі втрати на лінії у діапазоні частот від 62,5 МГц до 8 ГГц.

Пристрій генерує синусоїдальний сигнал високої частоти заданої потужності і створений для перевірки приймальних систем військового призначення у польових умовах, підтримує два інтерфейси обміну інформацією, що дає змогу керування через комп'ютер по USB або підключення до системи АСК по CAN шині.

Подальше удосконалення пристрою полягає у додаванні перемикача, який працюватиме на заданих частотах. Це дає змогу генерувати високочастотні імпульси короткої довжини. Після підключення генератора на вхід приймача, для тестування, можна подавати не просто статичний сигнал, а команди для більш ефективного тестування. Також вдосконаленню підлягає програмне забезпечення, що дасть змогу програмно керувати роботою генератора.

Література

1. Rohde & Schwarz. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/vector-signal-generators/rs-smbv100b-vector-signal-generator_63493-519808.html (date of access: 16.10.2023).
2. Dean Banerjee. PLL Performance, Simulation, and Design. 5th edition. Texas: Dog Ear Publishing, 2017. 497 p.
3. Bar-Giora Goldberg и Stephen L. Underwood. Direct Digital Synthesis: A Tool for Periodic Wave Generation and More, New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. 249 p.
4. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adf4372.pdf> (date of access: 15.11.2023).
5. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EV-ADF4372SD2Z-UG-1548.pdf> (date of access: 17.11.2023).
6. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADRF5730.pdf> (date of access: 25.11.2023).
7. Dunsmore D.P. Engineer's handbook. Measurements of microwave device parameters using advanced vector network analysis techniques. Moscow: TECHNOSPHERE, 2018. 736 p.