

Програмована система сигнального тракту пристроїв магнітного трекінгу для задач локальної навігації

Голяка Р. Л., Марусенкова Т. А., Прудіус І. Н., Фабіровський С. Є.

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: fabirovskii@gmail.com

Робота присвячена проблематиці апаратно-програмної реалізації пристроїв магнітного трекінгу для високоточного визначення положення об'єктів в просторі, зокрема в концепціях віртуальної та доповненої реальності. Базовий принцип методу магнітного трекінгу базується на розрахунку положення об'єктів за результатами динамічного вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів. Такі опорні магнітні поля формуються актюаторними котушками в низькочастотному спектрі електромагнітного випромінювання. Суттєвими перевагами систем магнітного трекінгу відносно систем оптичних систем є можливість функціонування поза зоною прямого бачення. Відносно систем інерціального трекінгу перевагами систем магнітного трекінгу є можливість високоточного вимірювання координат та відсутність похибок, що виникають внаслідок часового дрейфу сигналів акселерометрів та гіроскопів. Проте, сфера застосувань систем магнітного трекінгу є обмеженою. Це обумовлено паразитним впливом на результат вимірювання джерел сторонніх електромагнітних завад та металічних предметів, які спотворюють опорні поля. В даній роботі вирішується задача розроблення сигнального тракту пристроїв магнітного трекінгу просторового положення. Проблемами, що обумовили цю задачу, є необхідність забезпечення широкого діапазону зміни сигналів (до 120 dB) та високої завадостійкості вимірювання при специфічних умовах експлуатації. Запропоновані рішення направлені на підвищення точності та розширення зони вимірювання просторового положення, а їх новизною є алгоритм завадостійкого перетворення при динамічному перемиканні параметрів сигнального тракту. Враховуючи вимоги до сучасних радіоелектронних пристроїв, сигнальний тракт реалізовано на концепції програмованих систем на кристалі PSoC, Cypress Semiconductor. Представлено вибір та конфігурування компонентів сигнального тракту, результати SPICE модельних досліджень та приклад практичної реалізації.

Ключові слова: пристрої локальної навігації; апаратно-програмні засоби віртуальної реальності; магнітний трекінг; програмована вбудована система

DOI: [10.20535/RADAP.2020.80.48-56](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.48-56)

Вступ

Метод та технології реалізації магнітного/електромагнітного трекінгу (MT Magnetic Tracking, EMT Electromagnetic Tracking) є одними з новітніх напрямків розвитку сенсорної електроніки в навігації об'єктів для систем Інтернету речей (Internet of Things, IoT), віртуальної реальності (Virtual Reality, VR) та доповненої реальності (Augmented Reality, AR) [1]. Базовий принцип цього методу базується на визначенні просторового положення об'єктів за результатами динамічного вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів. Такі опорні магнітні поля формуються набором векторних актюаторів, а інформативні сигнали вимірюються векторними сенсорами. Здебільшого, формуються змінні (Alternative Current, AC) магнітні поля в низькочастотному спектрі електро-

магнітного випромінювання ($FMT=10^1 \dots 10^5$ Гц) [2].

Переважно, сенсори та актюатори реалізуються на основі оптимізованих для конкретних умов використання індуктивних котушок [3]. Інформативні сигнали взаємного положення індуктивних котушок «актюатор – сенсор» описуються, визначеними на етапах модельних та експериментальних досліджень, функціональними залежностями, основними аргументами яких є відстань між котушками та їх нахил одна відносно іншої. Крім того, визначальними факторами, що впливають на інформативні сигнали, є форма та частота опорного магнітного поля, вплив сторонніх об'єктів на магнітне поле, передавальна функція сигнального тракту тощо.

Суттєвими перевагами систем магнітного трекінгу відносно систем оптичного трекінгу OPT (Optical Tracking) є можливість функціонування по-

за зоною прямого бачення (Line-Of-Sight, LOS). Відносно систем інерціального трекінгу (Inertial Sensor Tracking, IST) на основі інерціальних вимірювальних модулів (Inertial Measurement Unit, IMU) перевагами систем магнітного трекінгу є можливість високоточного вимірювання координат сенсорів відносно сформованої матрицею актуаторів системи координат та відсутність похибок, що обумовлені часовим дрейфом сигналів акселерометрів [4] та гіроскопів [5].

Проте, сфера застосувань систем магнітного трекінгу є обмеженою. Причинами такого обмеження є жорсткі вимоги до оточуючого середовища, в якому формуються опорні магнітні поля. Основними з цих вимог є відсутність джерел сторонніх електромагнітних завад та металічних предметів, які спотворюють опорні поля.

Крім того, залежність інформативного сигналу просторового положення об'єкту в системах магнітного трекінгу описується оберненою кубічною функцією від відстані між актуаторами та сенсорами, що обумовлює значну зміну рівня сигналу [6]. Так, при переміщенні сенсора з точки на відстані $L_1 = 10$ см відносно актуатора в точку на відстані $L_2 = 100$ см, тобто при $L_2/L_1 = 10$, амплітуда напруги $V(L)$ корисного сигналу спадає в $V(L_2)/V(L_1) = 10^3$ раз, тобто на три порядки. Ще три порядки діапазону вимірювання вхідного сигналу необхідно забезпечити при врахуванні зміни взаємного кута нахилу в парі індуктивних котушок «актуатор – сенсор». Залежність сигналу при зміні кута нахилу описується тригонометричними функціями, зокрема, синуса чи косинуса в залежності від прийнятої системи координат [6]. Відтак, необхідно забезпечити динамічний діапазон сигнального тракту в 6 порядків (120 dB за напругою). Це обумовлює значні складності сигнального перетворення та обмеження на розміри простору, в якому забезпечується задана точність визначення координат.

В даній роботі вирішується задача розроблення сигнального тракту пристроїв магнітного трекінгу просторового положення. Новизною представлених в роботі рішень є алгоритм завадостійкого перетворення при динамічному перемиканні параметрів сигнального тракту, що створює передумови підвищення точності та розширення зони вимірювання просторового положення.

1 Огляд літератури

Прикладами сучасних задач та рішень, які розглядаються в науковій літературі з проблематики магнітного трекінгу є: розрахунок просторового положення об'єктів в 3D електромагнітних системах трекінгу [6], розроблення систем електромагнітного трекінгу для сканування ближніх полів (Near-Field Scanning) [7], калібрування вимірювальних систем трекінгу для динамічної компенсації спотворень ма-

гнітного поля [8], аналіз точності та моделювання похибок систем магнітного трекінгу [9], використання технології магнітного трекінгу в задачах навігації гнучких роботів [10], хірургії [11], моніторингу кінематики обличчя [12] тощо.

Прикладами сучасних індуктивних компонентів магнітних сенсорів трекінгу є інтегровані 3D (3 Dimensions) котушки, що формують та вимірюють три проекції B_X, B_Y, B_Z вектора індукції магнітного поля [13]. Конструкція таких індуктивних компонентів передбачає зменшення розмірів та адаптацію під конкретні умови експлуатації, зокрема для пристроїв віртуальної реальності [14].

Сучасним трендом розвитку систем магнітного трекінгу є використання концепції «злиття даних» (Data Fusion) та реалізація цієї концепції в сенсорній техніці – злиття сенсорів (Sensor Fusion) [15]. В даному контексті мова йде про поєднання індуктивних котушок з інерціальними 3D сенсорами [15, 16]. Значну увагу при розробленні таких систем приділяють новітнім рішенням сигнального тракту, які повинні відповідати вимогам мультифункціональності, динамічного конфігурування та програмування режимів роботи, критеріям сумісності з вбудованими системами (ES – Embedded System) вищезгаданих пристроїв IoT, VR та AR тощо.

У відповідності до цього, в даній роботі пропонується ефективне рішення сигнального тракту систем магнітного трекінгу на основі концепції «програмованих систем на кристалі (чіпі)» (PSoC – Programmable System on Chip) [18].

2 Аналіз проблеми

Основними проблемами, які необхідно вирішувати в процесі розроблення систем магнітного трекінгу, є забезпечення високої завадостійкості вимірювання корисних складових сигналів сенсорів при специфічних умовах експлуатації (рис. 1). По-перше, на параметри сигналу мають суттєвий вплив електромагнітні завади сторонніх випромінювачів (EM noise), зокрема, енергомереж, блоків живлення, пристроїв радіозв'язку тощо. По-друге, в ряді умов експлуатації спостерігається спотворення сторонніми об'єктами D (здебільшого металічними предметами) просторового розподілу опорного магнітного поля, що сформується актуаторними котушками. І, по-третє, має місце значна (до шести порядків) зміна рівня вхідних сигналів при зміні відстані LC між сенсорними S та актуаторними A котушками (типово, напруги корисного сигналу змінюються в межах $V = 10^{-1} \dots 10^{-7}$ В).

В системах магнітного трекінгу розглядають мінімальну L_{MIN} та максимальну L_{MAX} відстані, в межах яких забезпечуються умови коректного вимірювання. При цьому, мінімальна L_{MIN} відстань визначається спотворенням форми сигналу сенсора при його значних рівнях. Типово рівень обмеження

сигналу визначається напругою живлення сигнального тракту. Натомість, максимальна L_{MAX} відстань визначається співвідношенням сигнал-шум. При цьому, співвідношення інформативних сигналів, а саме, амплітудних значень напруг $V_A(L)$, на мінімальній L_{MIN} та максимальній відстанях L_{MAX} визначається степеневою залежністю:

$$\frac{V_A(L_{MIN})}{V_A(L_{MAX})} \propto \left(\frac{L_{MAX}}{L_{MIN}} \right)^3,$$

зокрема, при $\frac{V_A(L_{MIN} = 0.1)}{V_A(L_{MAX} = 1)} \approx 10^3$.

Далі, при аналізі проблеми динамічного діапазону рівня сигналів сигнального кола враховують залежність $V_A(L)$ взаємного кута нахилу α в парі індуктивних котушок «актюатор – сенсор». В першому наближенні ця залежність визначається як:

$$V(L, \alpha) \propto V(L) \cdot \sin(\alpha_0 + \alpha),$$

де α_0 – початкове значення кута, яке залежить від вибраної системи координат, взаємного розміщення сенсорної та актюаторних котушок та їх діаграми направленості.

При аналізі кутової роздільної здатності, необхідно щоб динамічний діапазон рівня сигналів забезпечував від двох до чотирьох порядків, в залежності від точності вимірювання. Відтак, сумуючи компоненту зміни відстаней та компоненту зміни взаємних кутів в парі індуктивних котушок «актюатор – сенсор», сигнальний тракт систем магнітного трекінгу повинен забезпечувати динамічний діапазон не менше шести порядків.

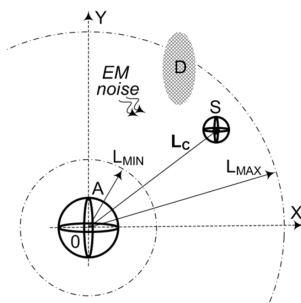


Рис. 1. Система магнітного трекінгу в просторі

Представлена в даній статті програмована система магнітного трекінгу є частиною комплексної науково-дослідної роботи по розробленню інтегрованого середовища Magnetic Tracking System Integrated Development Environment (MTS IDE), що проводиться нашим колективом в рамках ряду комерційних проектів (розкриття детальної інформації про ці проекти обмежено умовами цих проектів). MTS IDE призначено для підвищення ефективності процесу розроблення та параметричної оптимізації

вбудованих систем інтегрованих сенсорів електромагнітного трекінгу. Приклад такої системи для трекінгу руху людини в сенсорах віртуальної реальності, а також, деякі з використовуваних в системі індуктивних котушок, представлено на рис. 2.

В рамках цієї роботи та у відповідності до проведеного аналізу, проблема забезпечення завадостійкості до електромагнітних завад вирішується синхронним детектуванням корисних складових сигналів, проблема значної зміни рівня вхідних сигналів вирішується динамічною зміною коефіцієнту підсилення, а проблема впливу сторонніх металічних об'єктів – зміною форми та частоти опорних магнітних полів. Такі зміни реалізуються, зокрема, перемиканням кіл зворотного зв'язку підсилювачів та параметрів задаючих генераторів.



Рис. 2. Приклад вимірювальних перетворювачів та їх розміщення в системі магнітного трекінгу руху людини

3 Вибір та конфігурування компонентів сигнального тракту

Враховуючи вимоги до сучасної мікроелектроніки, зокрема до сенсорних пристроїв Інтернету Речей, сигнальний тракт сенсорів магнітного трекінгу реалізовано на концепції програмованих систем на кристалі, зокрема, на PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation. До структури PSoC входять вузли цифрових та аналогових систем, вузли мікропроцесора, матриці енергозалежної та енергонезалежної пам'яті, системні ресурси, а також вузли програмування та керування енергоспоживанням. Основою цифрових вузлів є матриця універсальних цифрових блоків, спеціалізованих цифрових блоків, зокрема для реалізації інтерфейсів, таймерів, широтно-імпульсних модуляторів тощо. Аналоговими вузлами PSoC є блоки на перемикальних конденсаторах та блоки з неперервним сигнальним перетворенням, зокрема: операційні підсилювачі, компаратори, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори тощо. Вузли з'єднуються програмно конфігурованою мережею сигнальних ліній.

Визначальними компонентами платформи PSoC5, на основі яких реалізована програмована система сигнального тракту магнітних сенсорів трекінгу, є синтезуючий генератор (8-bit Waveform Generator, Wave DAC8), мультифункціональний міксер (Mixer) та підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення (Programmable Gain Amplifier, PGA). Програмне керування цими компонентами здійснюється, використовуючи набори відповідних API (Application Programming Interface) функцій. Розглянемо основні функціональні можливості цих компонентів.

Синтезуючий генератор [19] реалізовано на основі буферованого 8-ми бітного цифро-аналогового перетворювача. Форма синтезованої хвилі задається миттєвими значеннями напруги, які зберігаються в енергонезалежній пам'яті чіпа. Основними параметрами, які задаються в процесі конфігурування генератора (рис. 3), є: діапазон зміни сигналу (Range), тип синхронізації (Internal or External clock), кількість виборок за секунду (Sample rate, kSPS), тип хвилі (Wave type), амплітуда (Amplitude), зміщення (Offset), фаза (Phase) та кількість виборок за один період синтезованого сигналу (Samples).

Визначальними для вирішення задачі мінімізації паразитного впливу сторонніх об'єктів на точність магнітного трекінгу є можливості оперативної зміни форми сигналу магнітного поля (вищезгаданий параметр Wave type) та їх частота (Sample rate, kSPS). Передбачений набір можливого вибору форми: синусоїдальний (Sine), прямокутний (Square), трикутний (Triangle), пилоподібний (Sawtooth) та визначений масивом точок (Arbitrary).

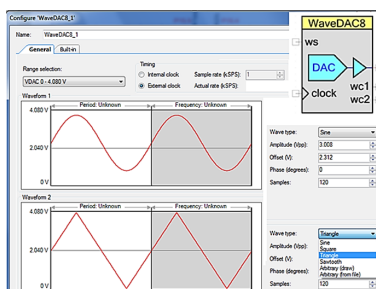


Рис. 3. Вікно конфігурування Wave DAC8

Мультифункціональний міксер (Mixer) [20] реалізує модуляцію сигналу в одному з двох режимів роботи: Up mixer – балансний міксер неперервного часу (continuous-time balance mixer), що виконує функцію перемикального перемножувача (switching multiplier) сигналів та Down mixer – міксер дискретного часу (discrete-time), що виконує функцію відбору та збереження (sample-and-hold) сигналу. У вікні конфігурування міксеру (рис. 4) проводиться вибір режиму роботи та ряд інших параметрів, зокрема рівень струму живлення, використання внутрішнього (Internal) чи зовнішнього (External) локального осцилятора (Local Oscillator, LO), частота осцилятора (LO Frequency). Там же ві-

зуалізуються вхідні та вихідні сигнали, а також результати швидкого перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform, FFT) цих сигналів. Для вирішення поставленої в даній роботі задачі забезпечення високої завадостійкості використовується режим Up mixer, який використовується для реалізації синхронного детектування сигналів.

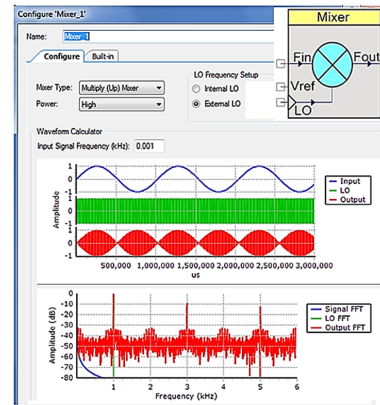


Рис. 4. Вікно конфігурування Міксер

Підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення PGA [21] реалізовано на основі універсального блоку SC/CT, який може функціонувати, як в режимі динамічного перемикавання зворотних зв'язків на матриці конденсаторів (Switched Capacitor), так і в режимі постійних зворотних зв'язків (Continuous Time). Програмований коефіцієнт підсилення визначається набором дискретних значень: 1 (0 dB), 2, 4, 8, 16, 24, 32, 48 та 50 (34 dB). Крім того, передбачена можливість вибору рівня струму живлення: високий (High Power), середній (Middle Power) та низький (Low Power). В свою чергу, ці рівні струму живлення підсилювача визначають його ширину смуги робочих частот та швидкість наростання вихідного сигналу. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача для вибраного рівня струму живлення візуалізується у вікні конфігурування (рис. 5).

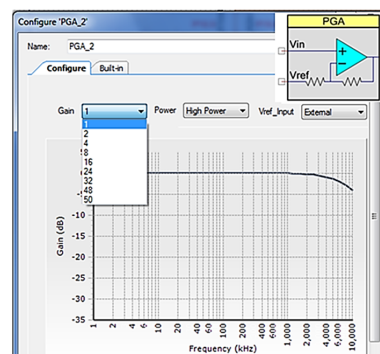


Рис. 5. Вікно конфігурування PGA

4 Функціонування та модельні дослідження синхронного детектора

Задача завадостійкого сигнального перетворення вирішена синхронним детектуванням на основі вищезгаданого мультифункціонального міксеру (Mixer) в режимі Up mixer. Спрощена схема такого сигнального перетворення представлена на рис. 6. Функція детектування здійснюється шляхом синхронного перемикання кіл зворотного зв'язку операційного підсилювача ОА – резисторів R_{IN} та R_{FB} . Таке перемикання здійснюється аналоговими ключами S_1 , S_2 та комутатором SW, що керуються від синхронізуючих імпульсів V_{SD} .

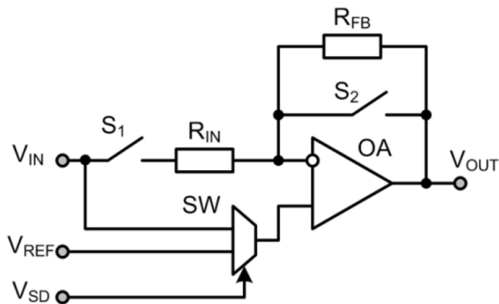


Рис. 6. Схема синхронного детектування сигналу

У додатній фазі вхідного сигналу ключ S_1 розімкнений, S_2 – замкнений, а комутатор SW з'єднує вхідне коло V_{IN} з неінвертуючим входом операційного підсилювача ОА. Відтак, ОА функціонує в режимі повторювача вхідного сигналу (коефіцієнт передачі за напругою $K_V = 1$). Натомість, у від'ємній фазі вхідного сигналу ключ S_1 замкнений, S_2 – розімкнений, а комутатор SW з'єднує неінвертуючий вхід операційного підсилювача ОА з колом опорної напруги V_{REF} . Відтак, ОА функціонує в режимі інвертора вхідного сигналу ($K_V = -1$).

З метою оптимізації режимів роботи детектора та оперативного аналізу ефективності завадостійкого сигнального перетворення була розроблена SPICE модель, схема якої наведена на рис. 5. Розглянемо призначення основних компонентів цієї моделі. Задаюче джерело напруги V_{AC} формує сигнал, який використовується для генерування опорного АС магнітного поля та синхронізації схеми детектування. Для формування синхронізуючих імпульсів детектора використовуються неінвертуючий X_{AD} та інвертуючий X_{INV} підсилювачі. Змінна та постійні складові завад формуються джерелом шуму X_{NS} та джерелом постійного зміщення (off-set) V_{DN} . Вихідні імпеданси цих джерел представляються резисторами R_{IN} та R_{NS} . Кола комутації синхронного детектора представлено ключами SW1, SW2 та SW3 типу S(V-Switch). Вихідна напруга протестованого сигналу формується на виході операційного підсилювача X_{OA} . Далі ця напруга

фільтрується чи інтегрується, зокрема компонентом X_{INT} .

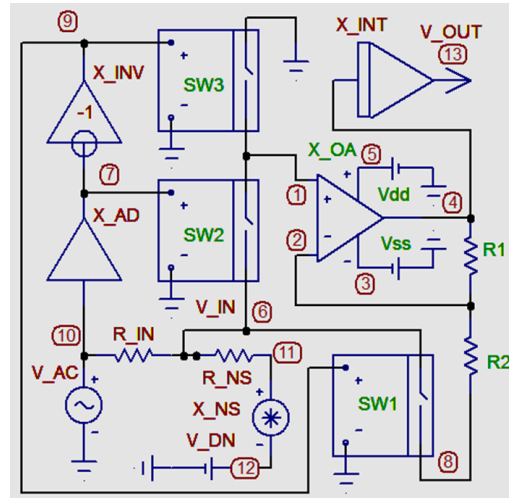


Рис. 7. Схема заміщення SPICE моделі сигнального перетворювача

Два типові приклади результатів модельних досліджень представлені на рис. 8 (ідеалізований варіант без завад) та рис. 9 (варіант з врахуванням певного рівня електромагнітного шуму та постійного зміщення паразитної складової сигналу). Напруга у вузлі 6 (у відповідності до синтаксису SPICE використовується позначення V(6)) представляє вхідний сигнал, напруга V(4) у вузлі 4 – сигнал на виході детектора, а напруга V(13) у вузлі 13 – сигнал на виході інтегратора. Як це вже відзначалося, результати таких модельних досліджень використовують для оптимізації режимів роботи детектора та аналізу його ефективності.

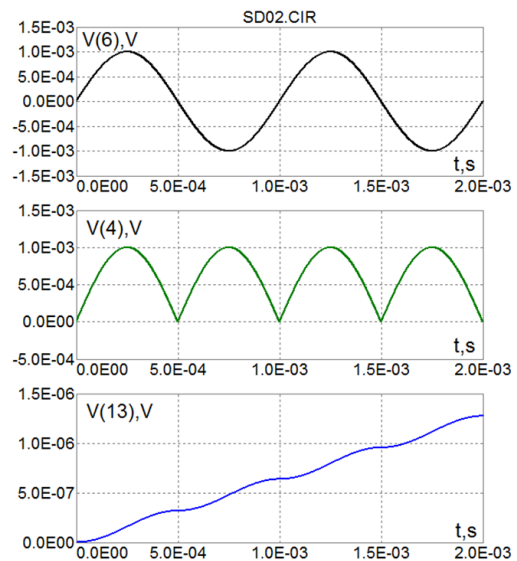


Рис. 8. Приклад модельних досліджень сигналу без завад

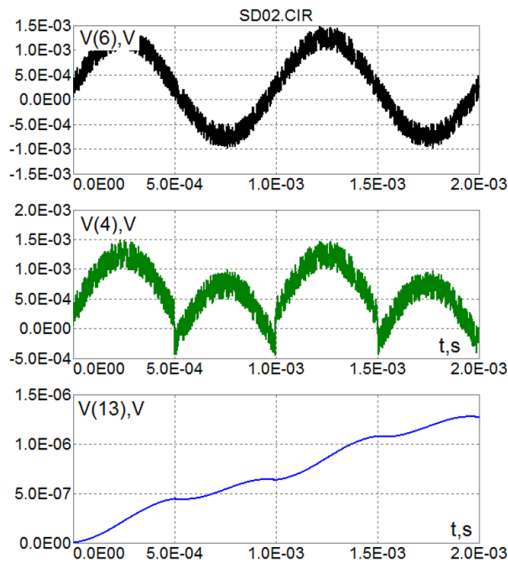


Рис. 9. Приклад модельних досліджень сигналу з задавами

5 Реалізація сигнального тракту магнітного трекінгу

Схема комутації компонентів платформи PSoC5 на рівні кристалу розробленої в рамках даної роботи програмованої системи сигнального тракту магнітних сенсорів трекінгу наведена на рис. 10.

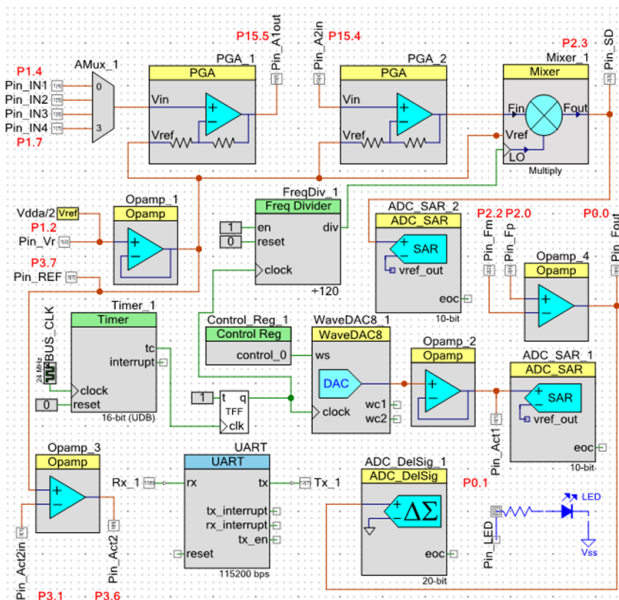


Рис. 10. Схема сигнального тракту в середовищі PSoC Creator

Задаючий генератор, імпульси якого використовуються в більшості кіл програмованої системи та задають частоту сформованого сигналу, реалізовано на таймері Timer_1. В свою чергу цей таймер синхронізується шинним таймером BUS_CLK 24 MHz. Після букерування на тригері TFF імпульси задаючого генератора поступають на вхід clock

генератора WaveDAC8, який синтезує форму сигналу, та вхід подільника частоти (Frequency Divider) Freq_Div_1, який формує імпульси керування синхронним детектором. Коефіцієнт поділу частоти K_D повинен відповідати кількості виборок N_S за один період синтезованого сигналу (Samples) генератора WaveDAC8 (в даному прикладі $K_D = N_S = 120$). Синхронне детектування здійснюється міксером Mixer_1.

Операційний підсилювач Opamp_1 використовується для формування кола опорної напруги V_{REF} , рівень якої може програмуватися в залежності від специфіки сигнального перетворення. В даному рішенні опорна напруга формується подільником напруги живлення аналогових кіл системи $V_{dda}/2$. Операційний підсилювач Opamp_1 в режимі повторювача напруги використовується для формування синфазної складової вихідної напруги, що використовується в актуаторах магнітного поля. Натомість, операційний підсилювач Opamp_2 в режимі інвертора напруги (резистори інвертора не входять в структуру чіпу, а відтак, на схемі не вказані) використовується для формування протифазної складової вихідної напруги.

Вхідне коло системи містить два послідовно з'єднані програмовані підсилювачі сигналу PGA_1, PGA_2 з сумарним коефіцієнтом підсилення в діапазоні від 1 до $50 \times 50 = 2500$. Для проміжного фільтрування сигналу та зменшення сумарного рівня паразитної напруги зміщення, яка присутня в підсилювачах, між виходом PGA_1 та входом PGA_2 використовується смуговий фільтр на зовнішніх (які не входять в чіп PSoC5) RC колах.

Задача фільтрування сигналу після міксера Mixer_1 синхронного детектора вирішується активним фільтром другого порядку на операційному підсилювачі Opamp_4.

Крім вищезгаданих підсилювачів вхідне коло містить динамічно керований чотириканальний аналоговий мультиплексор AMux_1, який уможливило комутацію сигналів від чотирьох індуктивних сенсорів. На практиці більш оптимальним рішенням є використання мультиплекса для трьох сигналів ортогонально розміщених сенсорів L_{BX}, L_{BY}, L_{BZ} та одного опорного сигналу. Цей опорний сигнал формується в сигнальному колі актуатора магнітних полів та використовується для компенсації параметричної нестабільності компонентів системи, а відтак, підвищення точності вимірювального перетворення.

В системі використано три аналого-цифрових перетворювача (АЦП). Основний з них – 20-ти бітний дельта-сигма АЦП ADC_DelSig_1 використовується для високоточного оцифрування відфільтрованих інформативних сигналів магнітного трекінгу. Два інші – 10-ти бітні АЦП послідовного наближення (Successive Approximation Register) ADC_SAR_1 та ADC_SAR_2 використовуються

для експрес-аналізу форм сигналів на виході системи (на актуаторах магнітного поля) та виході синхронного детектора (на міксері Mixer_1). Таке експрес спостереження форм сигналів є важливим в процесі відладки системи і обумовлюється можливими спотвореннями форми та фази сигналів при програмуванні форми сигналів, перемиканні коефіцієнтів підсилення, шунтуванні вихідних кіл системи вхідним імпедансом актуаторів магнітного поля тощо.

Макет програмованої системи сигнального тракту трекінгу на основі CY8C58xxLP модуля CY8CKIT-059 [22] та незначної кількості зовнішніх пасивних компонентів (здебільшого RC кіл фільтрування сигналів) представлено на рис. 11, приклад осцилографічного дослідження вхідного (1) та протекторного (2) сигналів – на рис. 12.

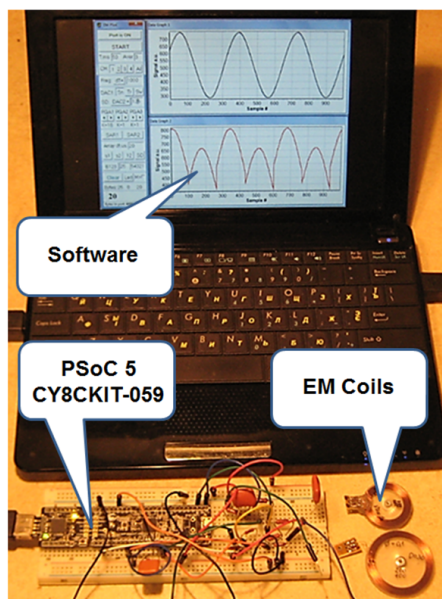


Рис. 11. Макет програмованої система сигнального тракту трекінгу на основі модуля CY8CKIT-059

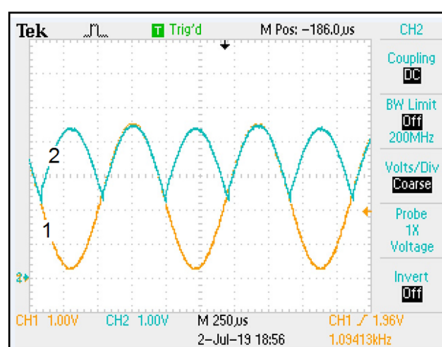


Рис. 12. Осцилограми сигналів

Керування режимами роботи вимірювальних кіл здійснюється з використанням універсального послідовного інтерфейсу UART. Компоненти PSoC конфігуруються та динамічно програмуються з використанням API функцій. Використовуючи ці API функції розроблено програмне забезпечення, основ-

ні вікна якого наведено на рис. 13. Показано, зокрема, вікно керування режимами роботи та візуалізацію результатів вимірювання задаючого сигналу та сигналу після синхронного детектування.

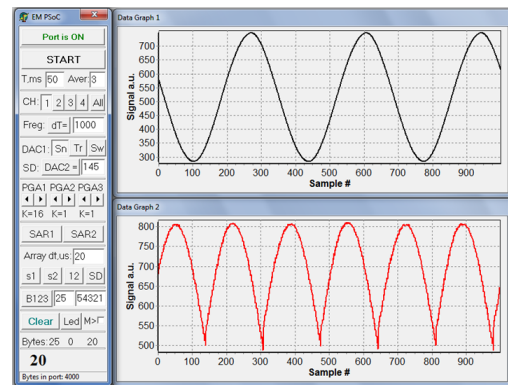


Рис. 13. Вікна програмного забезпечення

Приклад експериментальних досліджень, зокрема спотворення форми сигналів на виході синхронного детектора при динамічному перемиканні коефіцієнту підсилення, представлено на рис. 14 (по осі X представлено номер вимірювання Sample #, а по осі Y – сигнал в двійковому коді Signal a.u.). Перемикання здійснюється по заданому алгоритму, зокрема, після вимірювання серії з 1000 точок. Аналогічно проводять дослідження при зміні форми сигналу – синусоїдальний (Sine), прямокутний (Square), трикутний (Triangle), пилоподібний (Sawtooth) та специфікований масивом точок (Arbitrary) в програмі вбудованої системи.

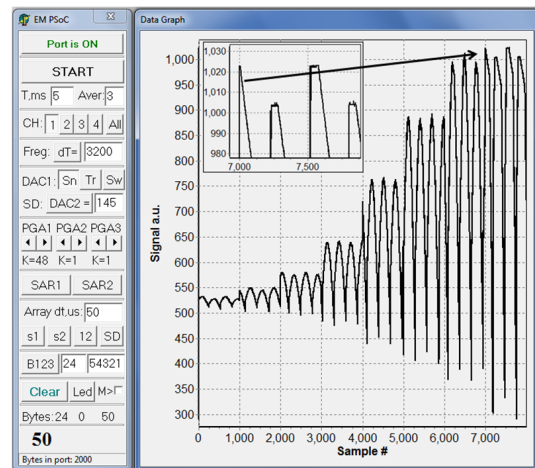


Рис. 14. Приклади експериментальних досліджень

Результати апробації розробленої системи в задачах магнітного трекінгу просторового положення будуть представлені в наших наступних публікаціях. Задачами таких досліджень будуть підвищення точності та розширення зони вимірювання просторового положення. Галузі застосування розробленої системи – радіоелектронні пристрої локальної навігації для задач віртуальної та доповненої реальності, трекінг інструментів в задачах малоінвазивної хірургії, робототехніка, анімація тощо.

Висновки

Представлені результати розроблення програмованої системи сигнального тракту сенсорів магнітного трекінгу просторового положення. Показано, що основними проблемами, які необхідно вирішувати в процесі розроблення систем магнітного трекінгу є забезпечення широкого діапазону зміни сигналів (до 120 dB) та високої завадостійкості вимірювання при специфічних умовах експлуатації. Новизною представлених рішень є алгоритм завадостійкого перетворення при динамічному перемиканні параметрів сигнального тракту, що створює передумови підвищення точності та розширення зони вимірювання просторового положення. Враховуючи вимоги до сучасної мікроелектроніки, зокрема до сенсорних пристроїв Інтернету Речей, сигнальний тракт сенсорів магнітного тракту реалізовано на концепції програмованих систем на кристалі, зокрема, на PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation. Визначальними компонентами платформи PSoC5, на основі яких реалізована програмована система, є 8-bit Waveform Generator, мультифункціональний Міксер та Programmable Gain Amplifiers. Програмне керування цими компонентами здійснюється використовуючи набори відповідних API функцій, на базі яких розроблено програмне забезпечення керування режимами роботи та візуалізації результатів вимірювання сигналів.

References

- [1] Dongsik Jo and Gerard Jounghyun Kim. (2016) ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 62, iss. 3, pp. 334–340. DOI: 10.1109/TCE.2016.7613201
- [2] Tobias Reichl, José Gardiazabal and Nassir Navab. (2013) Electromagnetic Servoing—A New Tracking Paradigm. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 32, iss. 8, pp. 1526–1535. DOI: 10.1109/TMI.2013.2259636
- [3] Ezequiel Navarro Pérez, Antonio Rojas Cuevas, Claudio Cañete Cabeza and etc. (2017) PREMO: VR EM Motion Tracking Sensors & Applications. *PREMO S.L.*, 224 p.
- [4] Dmytro Fedasyuk, Roman Holyaka and Tetyana Marusenkova. (2019) A Tester of the MEMS Accelerometers Operation Modes. *3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, pp. 227–230. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847840
- [5] Dmytro Fedasyuk, Roman Holyaka and Tetyana Marusenkova. (2019) Method of Analyzing Dynamic Characteristics of MEMS Gyroscopes in Test Measurement Mode. *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, pp. 157–160. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8780058
- [6] Wooyoung Kim, Jihoon Song and Frank C. Park. (2018) Closed-Form Position and Orientation Estimation for a Three-Axis Electromagnetic Tracking System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, iss. 5, pp. 4331–4337. DOI: 10.1109/TIE.2017.2760244
- [7] Hui He, Pratik Maheshwari and David J. Pommerenke. (2016) The Development of an EM-Field Probing System for Manual Near-Field Scanning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, iss. 2, pp. 356–363. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2496376
- [8] Hossein Sadjadi, Keyvan Hashtrudi-Zaad and Gabor Fichtinger. (2016) Simultaneous Electromagnetic Tracking and Calibration for Dynamic Field Distortion Compensation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 63, iss. 8, pp. 1771–1781. DOI: 10.1109/TBME.2015.2502138
- [9] Ian Sharp, Kegen Yu and Thurairappah Sathyan. (2012) Positional Accuracy Measurement and Error Modeling for Mobile Tracking. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, iss. 6, pp. 1021–1032. DOI:10.1109/TMC.2011.119
- [10] Shuang Song, Zheng Li, Haoyong Yu and Hongliang Ren. (2015) Electromagnetic Positioning for Tip Tracking and Shape Sensing of Flexible Robots. *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, iss. 8, pp. 4565–4575. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2424228
- [11] Alfred M. Franz, Tamás Haidegger, Wolfgang Birkfellner, Kevin Cleary, Terry M. Peters and Lena Maier-Hein. (2014) Electromagnetic Tracking in Medicine—A Review of Technology, Validation, and Applications. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 33, iss. 8, pp. 1702–1725. DOI: 10.1109/TMI.2014.2321777
- [12] Natasha Alves, Cecilia Jobst, Fanny Hotze, Paul Ferrari, Marc Lalancette, Tom Chau, Pascal van Lieshout and Douglas Cheyne. (2016) An MEG-Compatible Electromagnetic-Tracking System for Monitoring Orofacial Kinematics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 63, iss. 8, pp. 1709–1717. DOI: 10.1109/TBME.2015.2500102
- [13] Alice Matthews. (2017) *VR 3D electromagnetic motion tracking sensor*.
- [14] (2018) *Premo 3DV06 Datasheet*, 26 p.
- [15] Bjorn Waske and Jon Atli Benediktsson. (2007) Fusion of Support Vector Machines for Classification of Multisensor Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, iss. 12, pp. 3858–3866. DOI: 10.1109/TGRS.2007.898446
- [16] Isaac Skog. (2018) Inertial and Magnetic-Field Sensor Arrays - Capabilities and Challenge. *IEEE sensors conference*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2018.8589760
- [17] Houde Dai, Shuang Song, Chao Hu, Bo Sun and Zhirong Lin. (2018) A Novel 6-D Tracking Method by Fusion of 5-D Magnetic Tracking and 3-D Inertial Sensing. // *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, iss. 23, pp. 9640–9648. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2872650
- [18] *PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip*.
- [19] Cypress Semiconductor Corporation (2017) 8-Bit Waveform Generator (WaveDAC8) 2.10. *PSoC® Creator™ Component Datasheet*, 19 p.
- [20] Cypress Semiconductor Corporation (2017) Mixer 2.0. *PSoC® Creator™ Component Datasheet*, 16 p.
- [21] Cypress Semiconductor Corporation (2017) Programmable Gain Amplifier (PGA) 2.0. *PSoC® Creator™ Component Datasheet*, 16 p.
- [22] Cypress Semiconductor Corporation (2018) *CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide*.

Программируемая система сигнального тракта устройств магнитного трекинга для задач локальной навигации

Голяка Р. Л., Марусенкова Т. А., Прудюс И. Н., Фабировский С. Е.

Работа посвящена проблематике аппаратно-программной реализации устройств магнитного трекинга для высокоточного определения положения объектов в пространстве, в частности в концепциях Интернета вещей и виртуальной реальности. Базовый принцип метода магнитного трекинга базируется на расчете положения объектов по результатам динамического измерения вектора индукции опорных магнитных полей. Такие опорные магнитные поля формируются матрицами актюаторных катушек в низкочастотном диапазоне электромагнитного излучения. В данной работе решается задача разработки сигнального тракта устройств магнитного трекинга пространственного положения. Предлагаемые решения направлены на повышение точности и расширение зоны измерения пространственного положения, а их новизной алгоритм помехоустойчивого преобразования при динамическом переключении параметров сигнального тракта. Учитывая требования к современным радиоэлектронным устройствам, сигнальный тракт реализовано на концепции программируемых систем на кристалле, в частности, PSoC семейства 5LP Family Cypress Semiconductor.

Ключевые слова: устройства локальной навигации; аппаратно-программные средства виртуальной реальности; магнитный трекинг; программируемая встроенная система

Programmable Signal Path System for Magnetic Tracking Devices for Local Navigation Tasks

Holyaka R. L., Marusenkova T. A., Prudyus I. N., Fabirovskyy S. E.

Introduction. The article is dealing with the Magnetic Tracking signal path for measurement of objects' positions in nearby places. The basic principle of the Magnetic

Tracking method is based on measurement of magnetic induction of the reference magnetic fields and the calculation of the objects position based on it.

Problem analysis. Big advantages of magnetic tracking technologies are the non-line-of-sight feature compared to optical tracking and high accuracy of long time measurement compared to inertial tracking. However, a very large signal range and significant distortions due to nearby metallic objects are serious drawbacks preventing magnetic tracking from being widely used.

Selection and configuration of signal path components. Taking into account the requirements of up-to-day microelectronics, in particular for the sensors of the Internet of Things, the signal path of the Magnetic Tracking sensors is implemented on the concept of System on Chip. Basic components of the signal path are software Programmable Waveform Generator, Programmable Gain Amplifiers and Programmable Mixer. Configurations of the components are provided by Application Programming Interface routines.

Functional and model studies of the synchronous detector. Noise immune processing is based on synchronous detector. SPICE simulations and analysis of this detector are provided.

Implementation of signal path of magnetic tracking. The signal converter has been implemented on the Programmable System on Chip PSoC 5LP (Cypress Semiconductor). The module CY8CKIT-059 Prototyping Kit has been used. The developed software for controlling the measurement process provides controlling the conversion mode, dynamic amplification switching, analog-to-digit converting, etc.

Conclusions. The novelty of the solutions presented in the work is the combination of signal amplification dynamic switching and the noise immune processing. Reference magnetic fields are formed by actuator coils in the low-frequency spectrum of electromagnetic waves. Signals are produced by sensor coils and are used for objects position calculation. Technologies of Magnetic Tracking are considered as high promising solutions for Virtual Reality, Augmented Reality and Internet of Things.

Key words: local navigation devices; hardware and software virtual reality; magnetic tracking; programmable embedded system