

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Костинюк Іван Васильович
Kostinyuk Ivan

УДК 004:681.5

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр

Розробка автономного пошукового маяка для авіа моделей
Development of an autonomous search beacon for aircraft models

Науковий керівник:
доцент Дзундза Б.С.

Рецензент:

к.ф.-м.н., викладач

Яворський Я.С.

Івано-Франківськ

2024

АНОТАЦІЯ

У роботі розроблено пошуковий радіомаяк який вигідно відрізняється від альтернативних рішень відсутністю прив'язки до зони покриття мобільних операторів зв'язку, малою вагою та габаритами, а також наявністю кількох режимів пошуку: за GPS координатами, методом пеленгації радіосигналу, режимом Proximity. Для пошуку в ближній зоні маяк оснащений гучним звуковим сигналом та яскравим світлодіодом.

Оскільки радіомаяк не вимагає наявності базових станцій стільникових операторів то для взаємодії з маяком необхідна рація діапазону LPD яка підтримує видачу в ефір викликового тону Tone burst. З поширених та доступних моделей можна використовувати Baofeng UV-3R, Baofeng UV-5R, Quansheng UV-K5, Yaesu та інші.

Показано, що підхід із використанням мікроконтролера з низьким енергоспоживанням і трансівера RFM22 на сичтемі на кристалі SI4432 із кількома дискретними компонентами забезпечує прийнятну продуктивність і тривалий час автономної роботи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Костинюк І.В.			Анотація	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Дзундза Б.С.					3	1
Н. Контр.		.						
Затвердив								

ABSTRACT

In the work, a search radio beacon was developed, which differs favorably from alternative solutions by the lack of binding to the protection zone of mobile communication operators, low weight and dimensions, as well as the presence of several search modes: by GPS coordinates, the method of radio signal direction finding, and the Proximity mode. For searching in the near area, the beacon is equipped with a loud sound signal and a bright LED.

Since the radio beacon does not require the presence of base stations of cellular operators to interact with the beacon, the LPD part that supports the display of the Tone burst tone on the air call is necessary. From advanced and affordable models, you can use Baofeng UV-3R, Baofeng UV-5R, Quansheng UV-K5, Yaesu and others.

An approach using low-power microcells and an RFM22 transceiver on a grid on a SI4432 chip with several discrete components is shown to provide acceptable performance and long battery life.

<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
Розробив		Костинюк І.В.			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
Перевірів		Дзундза Б.С.			4	1	
					ABSTRACT		
Н. Контр.		.					
Затвердив							

Державний вищий навчальний заклад
 «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»
 Фізико-технічний факультет
 Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Пояснювальна записка
 до кваліфікаційної роботи на тему
 Розробка автономного пошукового маяка для авіа молелей

					123.KI-41.08			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розробив		Костинюк І.В.			Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Перевірив		Дзундза Б.С.					6	55
Н. Контр.								
Затвердив								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

GPS - Global Positioning System

GSM - Groupe Spécial Mobile

GPRS - General Packet Radio Service

IoT - internet of things

FM - frequency modulation

LoRa - Long Range

УКХ - Ультракорткі хвилі

NMEA - National Marine Electronics Association

AIS - Account Information Security

ECDIS - Electronic Chart Display and Information System

GMSK - Gaussian Minimum Shift Keying

PRIB - Плата первинного доступу

EEPROM - Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

SRAM - static random access memory

ISM - Integrated Management System

DC-DC - Direct Current

АЦП - Аналого-цифровий перетворювач

MCU - Microcontroller Unit

ADPCM - Adaptive differential pulse-code modulation

					123.KI-41.08	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОШУКУ ТА ПОЗИЦІОНУВАННЯ	10
1.1. Технології геопозиціонування (GPS).....	10
1.2. Технології передачі даних (GSM GPRS 3G, LORA, радіопередача за допомогою частотної модуляції (FM)).....	12
1.3. Система пошуку за допомогою радіопеленгації (Proximity).....	16
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ВИБІР КОМПОНЕНТІВ.....	21
2.1. GPS-приймач.....	21
2.2. Модем GMSK.....	22
2.3. Мікроконтролер.....	24
2.4. Передавач частотної модуляції (FM) RFM22-433.....	26
2.5. Система електроенергії.....	29
2.5.1. DC-DC перетворювач постійного струму.....	30
2.5.2. Розрахунок ємності батареї.....	32
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОШКОВОГО РАДІОМАЯКА.....	36
3.1. Робота з приймачем передавачем RFM22-433 (прийом, передача, детектування частотних сигналів).....	36
3.2. Апаратно-програмна розробка пошукового маяка.....	38
3.3. Вимірювання потужності шуму та дальності.....	42
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	50

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Транспондер - це пристрій, який використовується для відстеження літаків за допомогою вторинної радіолокаційної системи, але його можна навмисно вимкнути, і це дорогий предмет для безпілотних літальних апаратів. Ці фактори показали необхідність розробки ефективної системи стеження за БПЛА, яка не покладається на транспондери. З цією метою пропонується нова система відстеження літальних апаратів, яка буде називатися системою ідентифікаційного маяка позиціонування. Через розмір, масу, потужність і фінансові обмеження конструкція має бути невеликою, легкою, енергоефективною та рентабельною.

Варто розробити маячок призначений для пошуку втрачених предметів на місцевості, в основному для пошук втрачених авіамоделей (літаків, вертольотів, мультикоптерів). Також може застосовуються для пошуку ракет, повітряних куль, що впали, викрадених велосипедів і мотоциклів, і навіть для пошуку тварин!

Мета даної роботи запропонувати систему пошуку та розробити інноваційний пошуковий радіомаячок призначений для пошуку втрачених предметів.

Завдання даної роботи:

1. Розглянути існуючі системи технологій пошуку та позиціонування
2. Проаналізувати функціональні характеристики і вибрати потрібні компоненти
3. Реалізувати апаратно-програмне забезпечення пошукового радіомаяка

					123.KI-41.08	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОШУКУ ТА ПОЗИЦОНУВАННЯ

1.1. Технології геопозиціонування (GPS)

GPS або глобальна система позиціонування – це технологія, яка дозволяє приймачам на Землі визначати їхнє місцезнаходження та відстежувати рух. Він робить це, отримуючи сигнали приблизно від тридцяти супутників, що обертаються навколо планети.

Ця глобальна супутникова система безкоштовно надає інформацію про геолокацію та час на приймач GPS практично в будь-якій точці Землі, враховуючи, що немає перешкод і доступні принаймні три супутники GPS.

Ланцюг постачання та логістика є однією з багатьох галузей, які використовують приймачі GPS. Менеджери в цих сферах можуть використовувати технологію GPS для підвищення ефективності та точності своїх операцій[1].

GPS працює шляхом триангуляції положення пристрою/користувача відносно трьох або більше супутників GPS. Кожен супутник передає сигнал, який містить його місцезнаходження та поточний час. Порівнюючи мітки часу на сигналах від різних супутників, GPS-приймач може обчислити свою відстань до кожного супутника.

Маючи ці відстані в руках, він може використовувати трилатерацію, щоб визначити своє точне місцезнаходження на земній кулі. GPS використовується в усьому: від навігаційних програм до пристроїв із підтримкою GPS, як-от телефонів, автомобілів і засобів відстеження активів.

GPS працює за допомогою техніки, яка називається трилатерація. Трилатерація, яка використовується для обчислення місцезнаходження, швидкості та висоти, збирає сигнали від супутників для виведення інформації про місцезнаходження. Його часто приймають за триангуляцію, яка використовується для вимірювання кутів, а не відстаней.

GPS є потужним і надійним інструментом для компаній і організацій у багатьох галузях промисловості. Геодезисти, науковці, пілоти, капітани човнів,

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

служби швидкого реагування та працівники гірничої промисловості та сільського господарства – це лише деякі люди, які щодня використовують GPS для роботи. Вони використовують інформацію GPS для підготовки точних оглядів і карт, проведення точних вимірювань часу та відстеження положення, розташування та навігації. Поки особа на вулиці, GPS працює завжди та майже за будь-яких погодних умов.

Є п'ять основних способів використання:

- Розташування: Визначення позиції.
- Навігація: як дістатися з одного місця в інше.
- Відстеження: моніторинг об'єктів або особистого руху.
- Картографування: створення карт світу.
- Хронометраж: дозволяє робити точні вимірювання часу.

Системи GPS-відстеження останнім часом стають все більш поширеними у промислових виробничих умовах. Пристрої з підтримкою GPS здатні надавати геолокаційні дані для широкого спектру активів без електроживлення, від сировини та готової продукції до інструментів та обладнання.

Ці дані можна використовувати для оптимізації промислових процесів кількома способами. Наприклад, це може допомогти забезпечити ефективне використання сировини та своєчасну доставку готової продукції до потрібного пункту призначення. Крім того, дані GPS можна використовувати для моніторингу технічного обслуговування та ремонту обладнання, допомагаючи запобігти незапланованим простоям.

Зрештою, системи відстеження GPS є безцінним джерелом даних для промислових виробників, які прагнуть покращити свою діяльність.

Інші конкретні приклади випадків використання включають:

- Транспорт: логістичні компанії впроваджують телематичні системи для підвищення продуктивності та безпеки водіїв. Трекер транспортного засобу можна використовувати для підтримки оптимізації маршруту, економії палива, безпеки водія та відповідності.

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- Будівництво: від визначення місцезнаходження обладнання до вимірювання та покращення розподілу активів, GPS дозволяє компаніям підвищити рентабельність своїх активів.
- Реагування на надзвичайні ситуації: під час надзвичайної ситуації або стихійного лиха служби першої служби реагування використовують GPS для картографування, спостереження та прогнозування погоди та відстеження персоналу екстрених служб.
- Розваги: GPS можна використовувати в іграх і заходах, таких як Геокешинг.
- Здоров'я та фітнес. Смарт-годинник і носима технологія можуть відстежувати фітнес-активність і порівнювати її з подібною демографічною групою.

Плюси:

- Точне позиціонування на вулиці (до п'яти метрів)
- Працює всюди на відкритому повітрі
- Інфраструктура не потрібна

Мінуси:

- Високе споживання енергії
- Може бути перервано через погодні умови
- Не працює в приміщенні

1.2. Технології передачі даних (GSM GPRS 3G, LORA, радіопередача за допомогою частотної модуляції (FM))

З прогресом і розвитком часу суспільство поступово входить в Інтернет +, різні датчики збирають дані все більше і більше, слідує програми для великих даних, і люди розглядають можливість підключення різних пристроїв безпосередньо до Інтернету для полегшення збору даних, управління та аналізу і розрахунків.

Інтелект IoT більше не обмежується невеликими пристроями та невеликими мережевими етапами, а вийшов на повну сферу інтелектуальної індустріалізації.

					123.KI-41.08	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтелектуальна ІоТisation досягає зрілості у сфері великих даних, хмарних обчислень і віртуальної реальності та входить у все велике екологічне середовище Інтернет+.

Перше підключення ІоТ – це передача даних між двома або більше пристроями, які знаходяться в безпосередній близькості, щоб вирішити проблему підключення речей, переважно за допомогою дротових методів, після розгляду зручності розташування пристрою можна переміщувати за бажанням, пізніше більше використання бездротового зв'язку методи[2].

Проте з прогресом і розвитком технологій суспільство поступово увійшло в Інтернет+, усі види датчиків для збору даних стають все більш і більш багатими, традиційний метод підключення ІоТ може бути непридатним або відповідати різноманіттю підключень ІоТ на цьому етапі. Відповідно до різних типів терміналів існують інші способи підключення, нижче наведено кілька поширених дротових і бездротових технологій зв'язку.

Спроба зрозуміти різницю між різними варіантами мобільного підключення, перерахованими в специфікаціях смартфонів і рекламованими мобільними мережами як найкращий спосіб підключення до Інтернету, може заплутати. Розглянемо кожен з них нижче.

1. GSM

GSM (Глобальна система мобільного зв'язку) — це стандарт, за яким працює переважна більшість мобільних телефонів у Європі, і він стає домінуючим в інших частинах світу, де зараз цією системою користується понад 2 мільярди людей. Коли купуєте мобільний телефон або смартфон, важливо розуміти, які частоти використовуються кожною технологією, оскільки виробники та мережі мають тенденцію цитувати ці цифри без пояснення їх значення.

Більшість мереж GSM використовують 900 МГц і 1800 МГц, але в США 850 МГц і 1900 МГц є основними. Якщо вони вказані, телефон буде класифікований як тридіапазонний і його можна буде використовувати в Європі, США та багатьох інших територіях (за умови, що ваша SIM-карта активована). Якщо потрібен мобільний доступ на Далекому Сході та в таких регіонах, як Скандинавія, потрібно

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

буде уточнити у свого постачальника мобільного зв'язку, тому що буде потрібен принаймні чотиридіапазонний телефон, а в деяких регіонах працюватиме лише телефон, придбаний у країні.

Більшість телефонів GSM в основному використовуються для передачі голосу, але їх можна використовувати для мобільного доступу до Інтернету через базову мережу GPRS.

2. GPRS

GPRS — це система, яка використовується для передачі даних зі швидкістю до 60 кбіт/с і є дружнім способом надсилання й отримання електронної пошти та перегляду веб-сторінок, але в наші дні широкосмугового з'єднання декому це буде сприйматися як повільне. Щоб налаштувати з'єднання GPRS на своєму смартфоні, потрібно буде отримати від оператора мобільного зв'язку певну інформацію для введення в телефон. Більшість із задоволенням надасть цю інформацію, а деякі виробники, як-от Nokia, пропонують попередньо налаштовані файли, які можна встановити на телефон для своєї мережі.

GPRS є випробуваною системою, тому вона дуже надійна для використання стандартних мобільних даних і підійде людям із помірними потребами в даних. Після встановлення необхідних налаштувань ви можете використовувати мережу будь-коли, і вона не потребує подальших налаштувань, оскільки вона працює у фоновому режимі ваших програм, які підтримують Інтернет.

3. 3G

3G спочатку продавався як спосіб здійснення відеодзвінків у мобільній мережі, але також є високоефективним способом перегляду Інтернету та спілкування на вашому смартфоні за допомогою голосу через IP, електронною поштою та миттєвими повідомленнями. Більшість мереж Великобританії та деяких європейських мереж тепер мають мережі 3G, і зі швидкістю, подібною до EDGE, це швидко стає звичайним способом підключення під час подорожі.

У регіонах із слабким покриттям 3G телефон постійно намагатиметься знайти сигнал 3G, і це може істотно вплинути на час автономної роботи. Деякі телефони добре справляються з постійною активацією 3G, але час роботи батареї деяких

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

може скорочуватися до 50%. Наразі 3G має хороше покриття та забезпечує високошвидкісний доступ до Інтернету з вашого телефону та швидко стає стандартом мобільного підключення.

4. LoRa

LoRa (Long Range) — технологія бездротового зв'язку, заснована на модуляції радіосигналу. Це рішення апаратного рівня, яке дозволяє підключатися до LoRaWAN і передавати невеликі пакети даних від датчиків і смарт-пристроїв через систему шлюзу на сервер оператора.

Давайте розглянемо основні характеристики мережі LoRa:

- Можливості геолокації пристроїв LoRa дозволяють їм відстежувати місцезнаходження інших пристроїв;
- Технологія працює в неліцензійному діапазоні частот;
- Завдяки низькому енергоспоживанню в технології LoRa кінцеві пристрої можуть працювати роками без заміни батареї;
- Дальнє підключення LoRa знижує вартість розгортання мережі;
- Глибоке проникнення в приміщення забезпечує передачу сигналу в густонаселеному міському середовищі з підвальних приміщень;
- Безпечна передача даних за допомогою LoRa забезпечує шифрування інформації за допомогою одного з найнадійніших сучасних протоколів шифрування — AES-128;
- Масштабована передача даних: технологія дозволяє додавати стільки нових точок доступу та модулів, скільки потрібно;
- Гнучке налаштування параметрів зв'язку: оператору доступно понад 6000 налаштувань.

Ключові функції LoRa дозволяють використовувати цю технологію в Інтернеті речей (IoT): підключення на великі відстані дозволяє передавати дані датчиків пристрою за допомогою відносно невеликої кількості шлюзів.

					123.KI-41.08	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Система пошуку за допомогою радіопеленгації (PROXIMITY)

Радіопеленгатори обчислюють напрямок до радіопередавача, аналізуючи сигнал, який досягає антени. Один пеленгатор може визначити лінію пеленгу на передавач; кілька пеленгаторів можна використовувати разом для триангуляції розташування передавача. Технологія радіопеленгації врятувала незліченну кількість життів і є життєво важливим інструментом для пошуку та порятунку, починаючи від відстеження EPIRB, ELT, PLB та інших пристроїв визначення місцезнаходження вцілілих на морі до пошуку потерпілого в біді моряка, який не може вказати широту/довготу.

Радіопеленгатор може бути цінним інструментом безпеки навіть для комерційних і прогулянкових суден, які зазвичай не беруть участь у пошуково-рятувальних операціях. Наприклад, за допомогою пеленгатора можна визначити місцезнаходження людини [3].

RT-300 - це недорогий радіопеленгатор, що охоплює УКХ морський і авіаційний діапазони. Він може орієнтуватися на активовані аварійні маяки, включаючи радіомаяки EPIRB, PLB та інші маяки людини за бортом/пристрої визначення місцезнаходження вцілілих на морі. RT-300 можна керувати через інтерфейс NMEA для інтеграції в інші системи. (рис.1.1.)

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Рисунок 1.1. RT-300

Знання напрямку, звідки надходить радіосигнал, також може покращити загальну обізнаність про ситуацію, особливо якщо передача не містить назви судна. Ця перевага є найбільш корисною, коли пеленгатор інтегровано в інші системи, що дозволяє відображати пеленг на дисплеї ECDIS разом із радаром і цілями AIS.

І, нарешті, є давня традиція моряків надавати допомогу тим, хто зазнає лиха на морі. Наявність пеленгу від пеленгатора може допомогти визначити місцезнаходження найближчих суден, які зазнають лиха, надаючи додатковий контекст для виклику «MAYDAY» по радіо.

Навіть якщо судно не в змозі надати безпосередню допомогу, надання лінії пеленгу береговій охороні може допомогти звузити місцезнаходження абонента MAYDAY і прискорити пошуково-рятувальні дії.

Одним із різноманітних методів, що використовуються в радіопеленгації, є метод Доплера, який обчислює пеленг шляхом вимірювання доплерівського зсуву сигналу, коли антена швидко рухається по колу.

					123.KI-41.08	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібно до того, як ви можете відчувати зміну тону сирени автомобіля швидкої допомоги, такий же принцип можна застосувати до радіохвиль.

Ось як це працює:

1. Оскільки неможливо фізично обертати антену з достатньою швидкістю для вимірювання доплерівського зсуву, пеленгатор електрично перемикається між кожним елементом антени у швидкій послідовності, щоб імітувати рух по колу. Коли антена «обертається», вона «пересувається» ближче і далі від передавача.
2. У міру того, як антена «рухається» до передавача, прийнята частота зростатиме.
3. Так само, коли антена «відсувається» від передавача, прийнята частота буде зменшуватися.
4. Аналізуючи синусоїду, що представляє цю зміну частоти, пеленгатор може визначити пеленг на передавач.

Компанія RHOTNETA використала понад три десятиліття інженерного досвіду в розробці своїх доплерівських пеленгаторів. Відмінною рисою дизайну компанії є надзвичайно висока швидкість обертання 3 кГц, що дозволяє швидко визначити пеленг. Щоб ще більше підвищити точність, пеленгатори RHOTNETA чергують обертання за годинниковою стрілкою та проти годинникової стрілки та реалізують власний алгоритм підсумовування фаз та усереднення.

Такі системи радіопеленгації є достатньо дорогими і їх застосування для пошуку безпілотних літальних апаратів не завжди доцільне. Втрачену радіокеровану авіамодель, якщо на ній є пошуковий радіомаячок можна шукати простими методами, наприклад, за допомогою звичайної портативної радіостанції (рації).

У даному режимі маяк оцінює рівень прийнятого викликового сигналу рації та повідомляє його в ефір голосом. Рівень сигналу видається в умовних одиницях від 0 до 99 де 99 - найсильніший сигнал. Додатково в налаштуваннях маяка можна увімкнути тоновий сигнал, який дублює цю інформацію тоновим сигналом: чим вище тон, тим сильніший сигнал.

					123.KI-41.08	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для входу в цикл пошуку в даному режимі необхідно надіслати сигнал виклику на заданій частоті. У відповідь маяк повідомляє рівень сигналу, що приймається, і знову чекає виклик. Якщо виклику немає, активується цикл викликового маяка з тритоновими сигналами і голосовим повідомленням координат. Якщо виклик отримано знову, маяк входить у цикл “запит-відповідь”: негайно повідомляючи рівень сигналу у відповідь виклик. Таким чином, по черзі викликаючи маяк та прослуховуючи його повідомлення, можна ефективно скоротити час взяття пеленгу.

Процедура пошуку виглядає так: притискаючи рацію до живота і, повертаючись навколо своєї осі на фіксований кут, викликаємо маяк і слухаємо його відповідь. При цьому запам'ятовуємо напрям на слабкий сигнал. Напрямок на маяк буде у вас за спиною(рис.1.2).

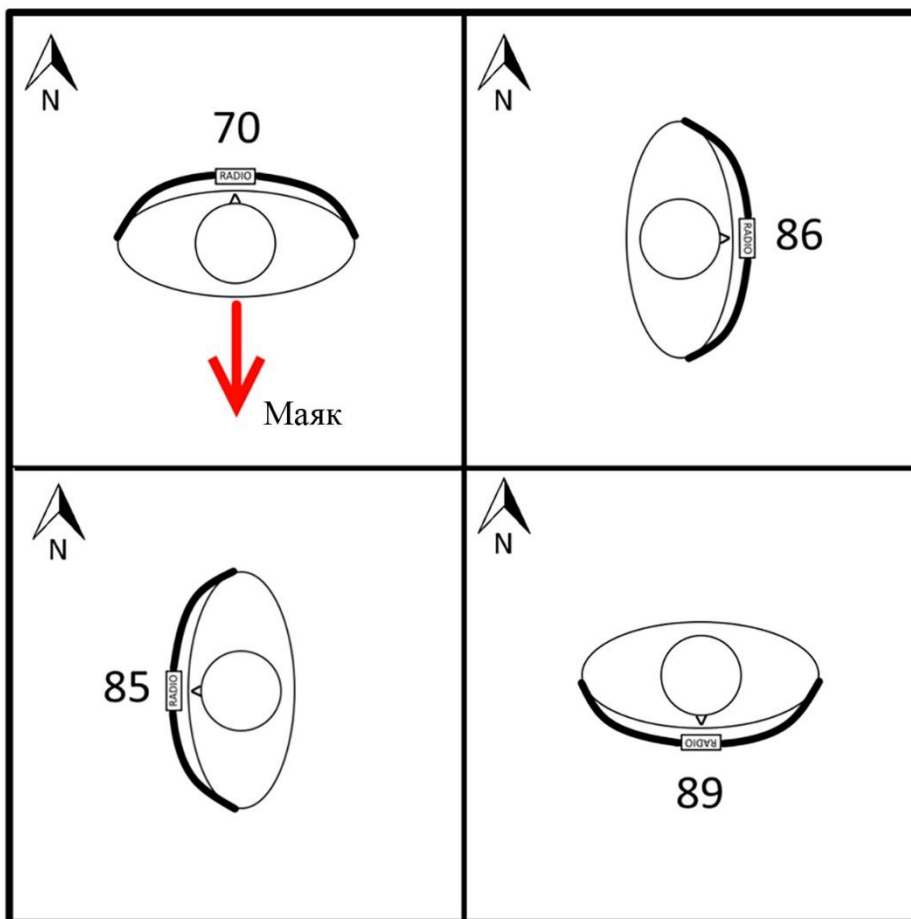


Рис. 1.2. Метод пошуку за допомогою рації.

Принцип аналогічний під час використання спрямованої антени.

Пошук методом класичної пеленгації. Даний метод аналогічний режиму Proximity і заснований на тому самому принципі. Основна різниця в тому, що рівень сигналу доведеться визначати на слух або по S-метру рації(рис.1.3.).

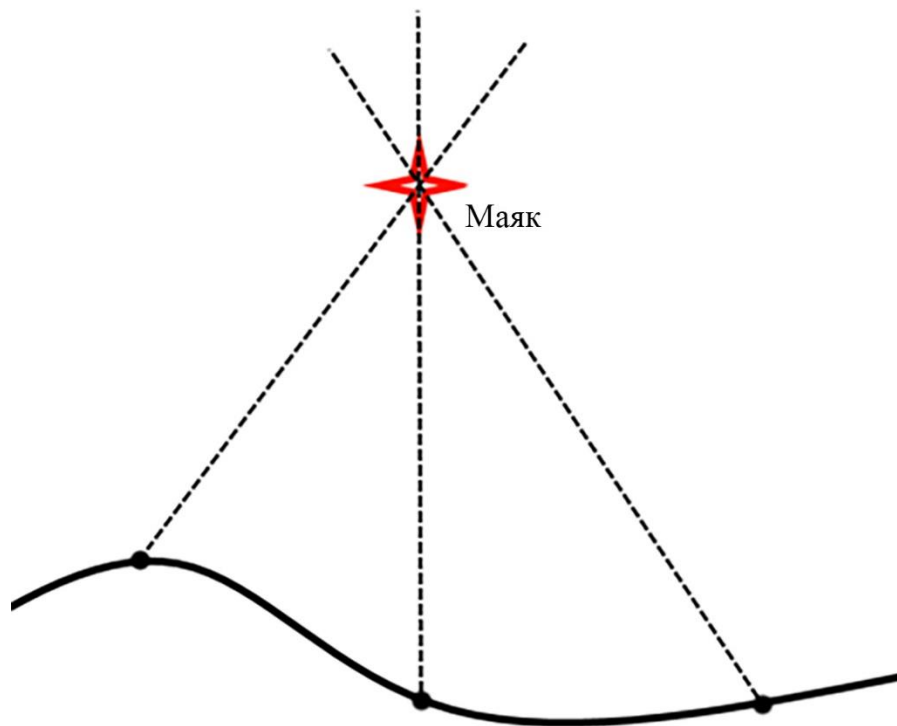


Рисунок 1.3. Метод пошуку класичної пеленгації

Трохтоновий сигнал, який видає маячок, складається з тонів різної потужності (перший 100 мВт, другий 13 мВт, третій 1.3 мВт). Екрануючи рацію тілом, або використовуючи спрямовану антену, потрібно знайти напрямок, з якого приймається найсильніший сигнал. Далі, необхідно або просто рухатися в напрямку сигналу, або взявши кілька пеленгів, побудувати на карті лінії напрямків і рухатися в їх точку перетину.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ВИБІР КОМПОНЕНТІВ

2.1. GPS-приймач

Основне призначення приймача GPS полягає в тому, щоб дозволити літальному апарату безперервно фіксувати власне місцезнаходження, а потім багаторазово передавати його по каналу передачі даних VHF або UHF.

PRIB має бути якомога меншим і придатним для роботи від батареї, тому вибраний модуль GPS-приймача має бути легко інтегрований у спеціальну апаратну конструкцію, яка також є портативною та енергоефективною. Приймач GPS повинен легко інтегруватися в мікроконтролер, мати низьке енергоспоживання та малий форм-фактор.

Виходячи з вищезазначених вимог, було обрано модуль uTracker02[4], який є інтерфейсною платою, оснащеною GPS-приймачем iTRAX02. Все, що потрібно для підтримки цієї плати, це джерело живлення 3,3 В, антена та призначені контакти введення/виведення, підключені до мікроконтролера для передачі даних і керування.

iTRAX02 — це одноплатний 12-канальний високоточний GPS-приймач з паралельними каналами, який обробляє супутникові сигнали та передає їх на мікроконтролер. GPS-приймач обробляє кодові сигнали грубого захоплення (C/A) від видимих супутників GPS, які передають радіочастотну навігаційну інформацію.

Коли доступно менше чотирьох супутників, приймач GPS підтримує 2D-навігацію. Щоб обчислити точку фіксації в режимі 2D-навігації, приймач використовує або останню висоту, визначену в режимі 3D-навігації, або дані, надані користувачем. Приймач має два незалежних асинхронних послідовних порти введення/виведення. Основний послідовний порт приймача виводить навігаційні дані та приймає команди у форматі NMEA-0183. Вторинний послідовний порт приймача приймає диференціальні поправки GPS 37 (DGPS) у

					123.KI-41.08	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форматі RTCM SC-104. На рисунку 2.1. показано базове з'єднання між GPS-приймачем UTRACKER02 і мікроконтролером MSP430.

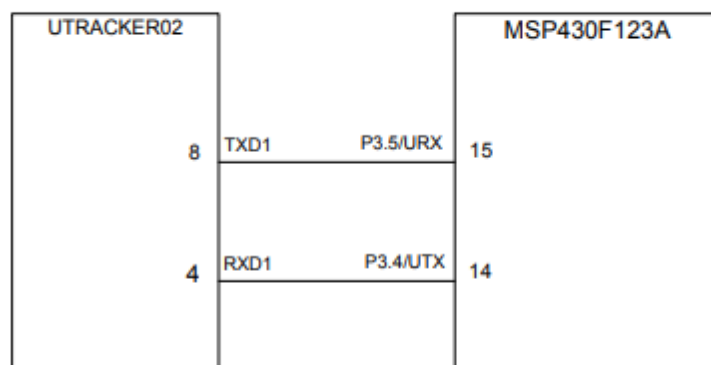


Рисунок 2.1. Підключення приймача GPS і мікроконтролера

UTRACKER02 — це надзвичайно ефективний GPS-приймач, який здатний забезпечувати безперервне відстеження та навігацію до рівня сигналу -150 дБм з посиленням антени 0 дБ. Цей модуль споживає лише 130 мВт у безперервній роботі зі швидкістю 1 фіксація на секунду, але це споживання енергії можна зменшити, працюючи на нижчій швидкості фіксації, напр. одне виправлення кожні чотири секунди, це можливо, тому що UTRACKER02 переходить у стан сну з низьким енергоспоживанням між виправленнями.

2.2. Модем GMSK(4.1.2.)

Було розглянуто проектування модему GMSK, однак реалізація дизайну потребує кількох інтегральних схем (IC), що зробить остаточний блок PRIB занадто громіздким і менш енергоефективним, і в результаті від цієї ідеї відмовилися. Замість цього було вирішено використовувати комерційно доступну інтегральну схему. Модем CMX589A[5] базової смуги 38 GMSK виробництва Consumer Microcircuits Limited у Великобританії був обраний тому, що він недорогий, легко підключається до мікроконтролера та має досить хорошу продуктивність. Він вводить послідовні цифрові дані та створює відфільтрований вихідний сигнал, який можна подавати безпосередньо на вхід передавача.

CMX589A має широкий діапазон доступних швидкостей передачі даних від 4 Кбіт/с до 200 Кбіт/с. Як швидкість передачі даних, так і ВТ або коефіцієнт

					123.KI-41.08	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пропускної здатності даних (0,3 або 0,5) програмуються контактами. Енергоспоживання модему надзвичайно низьке. Для швидкості передачі даних 64 кбіт/с потужність, споживана модемом, має бути менше 20 мВт. Модем має окремі енергозберігаючі входи для передачі та прийому, що дозволяє працювати в повному або напівдуплексному режимі, оскільки PRIB потребує лише передачі даних, секція приймача модему не використовується, тому він споживає менше енергії. Секція передачі вимагає, щоб принаймні чотири сигнали були з'єднані з мікроконтролером для належного функціонування, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1. З'єднання сигналів з мікроконтролером

Сигнал	Опис
TX Enable	Логічна 1, застосована до цього входу, дозволяє передачу даних
TX PSAVE	Логічна 1, застосована до цього входу, вимкне всі схеми передачі, за винятком синхронізації TX.
TX Data	Вхід логічного рівня для даних, що передаються. Ці дані повинні бути синхронними з TX CLK
TX CLK	Вихід тактового сигналу логічного рівня на швидкості передачі даних

Ці чотири сигнали безпосередньо підключаються до двох контактів вводу-виводу порту 2 і двох контактів вводу-виводу порту 3 мікроконтролера, як показано на рисунку 2.2. Причина підключення 39 сигналу TXCLK до одного з контактів вводу/виводу порту 2 (P2.3) полягає в тому, що кожен біт, який потрібно передати, повинен бути синхронізований з переходом сигналу TXCLK з низького рівня на високий. Порт 1 і порт 2 мікроконтролера можуть виявити цей перехід, тоді як порт 3 не може.

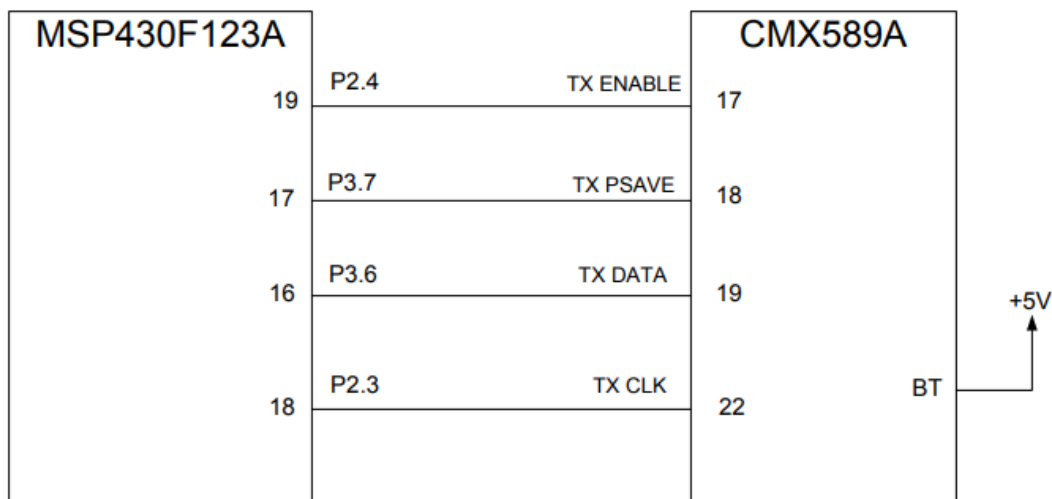


Рисунок 2.2. Підключення мікроконтролера та модему GMSK

Щоб переконатися, що схеми відновлення тактового сигналу CMX589A та рівня Rx працюють правильно, необхідно переконатися, що передані дані мають досить випадкову структуру. Рекомендується, щоб дані містили однакову кількість одиниць або нулів без довгих послідовних одиниць або нулів. Коли дані передаються пакетами, перед кожним пакетом має передувати принаймні 16 біт тренувальної послідовності, призначеної для того, щоб дозволити приймальному модему якомога швидше встановити синхронізацію та блокування рівня. Ця навчальна послідовність для BT=0,5 бажано повинна складатися з чергування одиниць і нулів (1010101010101010)[5].

2.3. Мікроконтролер(AtMega328)

ATmega328 має 1 Кбайт електрично стираної програмованої постійної пам'яті (EEPROM). Ця властивість показує, якщо електричне живлення, що подається на мікроконтролер, видалено, навіть тоді він може зберігати дані та може надавати результати після забезпечення його електричним живленням. Крім того, ATmega-328 має 2 КБ статичної оперативної пам'яті (SRAM). Інші характеристики будуть пояснені пізніше. ATmega 328 має кілька різних функцій, які роблять його найпопулярнішим пристроєм на сучасному ринку. Ці функції включають вдосконалену архітектуру RISC, хорошу продуктивність, низьке енергоспоживання, лічильник реального часу з окремим генератором, 6 контактів

ШІМ, програмований послідовний USART, блокування програмування для безпеки програмного забезпечення, пропускну здатність до 20 MIPS тощо[6].

ATmega328 — це 8-розрядний 28-контактний мікроконтролер AVR, виготовлений компанією Microchip, відповідає архітектурі RISC і має програмну пам'ять флеш-пам'яті розміром 32 КБ(рис.2.3.).

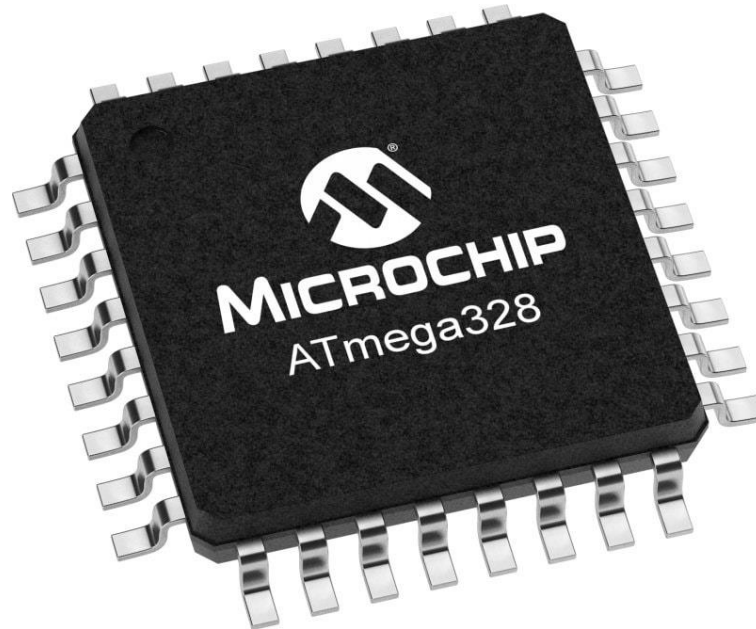


Рисунок 2.3. ATmega328

Atmega328 — це мікроконтролер, який використовується в базових платах Arduino, наприклад Arduino UNO, Arduino Pro Mini та Arduino Nano.

Об'єм пам'яті EEPROM становить 1 КБ, а SRAM – 2 КБ.

Він має 8 контактів для операцій АЦП, які об'єднуються, щоб утворити порт А (РА0 - РА7).

Він також має 3 вбудованих таймера, два з них є 8-бітними, а третій - 16-бітним.

Він працює в діапазоні від 3,3 В до 5,5 В, але зазвичай ми використовуємо 5 В як стандарт.

Його відмінні характеристики включають економічність, низьке розсіювання потужності, блокування програмування для цілей безпеки, лічильник реального часу з окремим генератором.

У наступній таблиці 2 наведено всі функції ATmega328:

					123.KI-41.08	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2. Особливості АТmega328

Особливості АТmega328	
Кількість шпильок	28
CPU	RISC 8-Bit AVR
Робоча напруга	1.8 to 5.5 V
Програмна пам'ять	32KB
Тип пам'яті програми	Flash
SRAM	2048 байт
EEPROM	1024 байт
АЦП	10-бітний
Кількість каналів АЦП	8
ШІМ	6
компаратор	1
Пакети (4)	8-контактний PDIP 32-вивідний TQFP 28-контактний QFN/MLF 32-контактний QFN/MLF
Осцилятор	до 20 МГц
Таймер (3)	8-біт x 2 і 16-біт x 1
Покращене скидання під час увімкнення	Має
Таймер увімкнення	Має
Виводи введення/виведення	23
Виробник	Мікрочіп
Сторожовий таймер	Має
Виявлення затемнення	Має
USI (універсальний послідовний інтерфейс)	Має
Мінімальна робоча температура	-40 C to +85 C

2.4. Передавач частотної модуляції (FM) RFM22-433

Експериментальний PR1B використовує для роботи діапазон Industrial, Science and Medical (ISM). Цей діапазон був обраний тому, що він є хорошим

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

вибором радіочастоти для лінії передачі даних літака, з низькою вартістю впровадження та роботою в неліцензованому діапазоні частот. Оскільки PRIB використовує симплексну (односторонню) архітектуру та модуляцію GMSK, системі потрібен FM-передавач, здатний працювати в діапазоні ISM 902-928 МГц. Додатковими вимогами є низька вихідна потужність і сумісність із середньою швидкістю передачі даних. Для реалізації цієї частини зв'язку було обрано передавач RF2512 FM/FSK[7] із пристроїв RF Micro. PRIB, призначений для літаків, потребує виділеного діапазону частот.

Діапазон транспондерів на 1090 МГц вже переповнений. Кращим вибором було б захопити кілька каналів для високочастотного кінця мобільного телефону AMPS діапазон, близько 890 МГц.

RFM22 — це недорогий приймально-передавальний модуль ISM, який пропонує розширені функції радіозв'язку, включаючи безперервне покриття частот від 240–930 МГц і регульовану вихідну потужність до +17 дБм. Надзвичайно низька чутливість прийому (−118 дБм) у поєднанні з найкращою в галузі вихідною потужністю +17 дБм забезпечує розширений діапазон і покращену продуктивність зв'язку.

Підтримку стрибкоподібної зміни частоти можна використовувати для подальшого розширення діапазону та підвищення продуктивності. Додаткові системні функції, такі як автоматичний таймер пробудження, детектор низького заряду батареї, 64-байтові TX/RX FIFO, автоматична обробка пакетів і виявлення преамбули, зменшують загальне споживання струму та дозволяють використовувати менш дорогі системні MCU. Вбудований датчик температури, АЦП загального призначення, скидання при включенні живлення (POR) і GPIO додатково знижують загальну вартість і розмір системи.

Архітектура цифрового прийому RFM22 включає високопродуктивний модем на основі АЦП і DSP, який виконує демодуляцію, фільтрацію та обробку пакетів для підвищення гнучкості та продуктивності. Ця цифрова архітектура спрощує проектування системи, одночасно дозволяючи використовувати мікроконтролери нижчого рівня. Пряма цифрова модуляція передачі та

					123.KI-41.08	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматичне змінення потужності РА забезпечують точну модуляцію передачі та зменшене спектральне розширення, що забезпечує відповідність нормам FCC та ETSI(рис.2.4.).

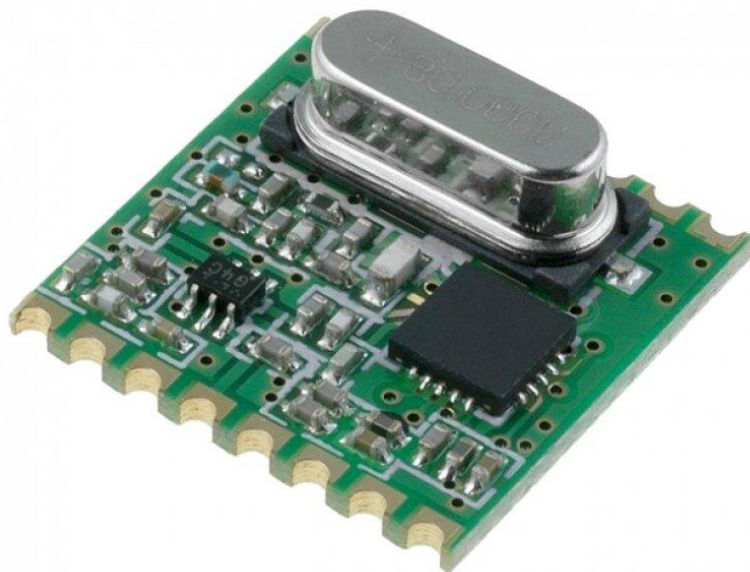


Рисунок 2.4. RFM22

Особливості:

- Діапазон частот = 240–930 МГц
- Чутливість = -118 дБм
- Максимальна вихідна потужність $+17$ дБм
- Налаштовується від $+8$ до $+17$ дБм
- Низьке енергоспоживання
- Отримано $18,5$ мА
- 27 мА при передачі $+11$ дБм
- Швидкість передачі даних = від 1 до 128 кбіт/с
- Джерело живлення = $1,8-3,6$ В
- Режим вимкнення з наднизьким енергоспоживанням
- Цифровий RSSI
- Пробудження по радіо
- Автоматичне калібрування частоти (AFC)

					123.KI-41.08	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5. Система електроенергії

PRIB повинен мати два джерела живлення. Первинне джерело використовує живлення від електричної системи літака, а вторинне джерело має бути самодостатнім і здатним працювати приблизно від 10 до 15 годин. Якщо первинне джерело виходить з ладу, система повинна мати можливість автоматично перемикається на вторинне джерело.

Система електроживлення (EPS) повинна подавати живлення на GPS-приймач, мікроконтролер і передавач радіомаяка. Оскільки електрична система літака здатна працювати з високою потужністю, конструкція EPS є простою, коли використовується первинне джерело, але слід бути обережним з конструкцією вторинного джерела. Тому що вторинне джерело має бути самодостатнім, він повинен використовувати акумуляторні батареї.

Блок живлення призначений для забезпечення повної резервної системи для PRIB. Потужність для зарядки батареї надходить від електричної системи літака, і передбачається діапазон вхідної напруги від 12 В до 24 В. Блок-схема джерела живлення показана на рисунку 2.5.

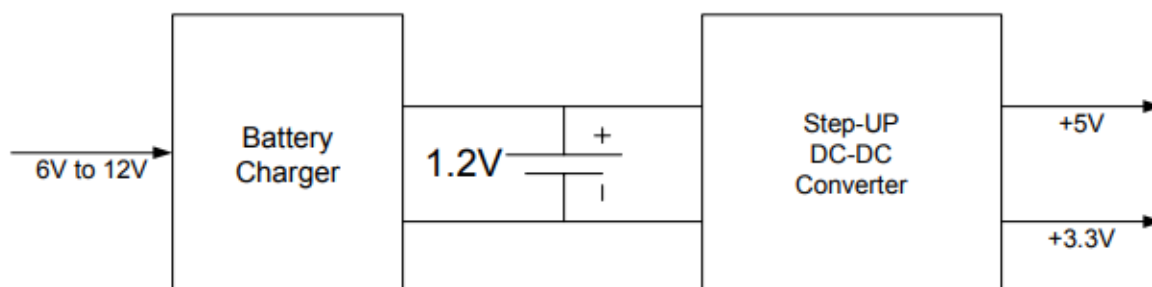


Рисунок 2.5. Джерело живлення

Блок живлення складається із зарядного пристрою, який відповідає за зарядку одноелементної нікель-кадмієвої (NiCD) або нікель-метал-гідридної (NiMH) батареї, і високоефективного перетворювача постійного струму в постійний, який відповідає за забезпечення +3,3 В і +5В вимагається схемою PRIB. Коли електрична система літака здатна забезпечити +12 В, зарядний пристрій батареї починає заряджати батарею та подавати частину електроенергії, необхідної для

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

схеми PRIB. Після повного заряджання батареї або зняття електричної системи літака зарядний пристрій перестає працювати, і батарея починає забезпечувати всю необхідну потужність. Важливо відзначити, що перемикання з електричної системи літака на батарею відбувається без затримки; це можливо, оскільки батарея завжди в мережі і служить джерелом живлення для перетворювача DC-DC.

Поки живлення системи літака присутнє, бортовий зарядний пристрій заряджає акумулятор і забезпечує енергію, необхідну для блоку PRIB. Заряджання не відбудеться, якщо виконується будь-яка з наступних умов:

- Живлення системи літака нижче 5 В
- Батарея вже заряджена

Для забезпечення тривалого терміну служби акумулятора та надійного заряджання використовується спеціальна схема зарядного пристрою на основі MAX712[8]. Важливо зазначити, що цей зарядний пристрій підтримує лише акумулятори, що використовують технології NiMH та NiCD. MAX712 завжди в одному з двох станів: швидка зарядка або крапельна зарядка. Під час швидкого заряджання використовується висока зарядна ємність ($C/4$), де C — ємність акумулятора в ампер-годинах або міліампер-годинах; після виявлення повного заряду струм зменшується до крапельного заряду, використовуючи швидкість заряду приблизно $C/16$.

Зарядний пристрій налаштовано на зарядку зі швидкістю $C/4$; іншими словами, щоб повністю зарядити розряджену батарею, знадобиться не менше чотирьох годин. Цю швидкість заряду вибрано тому, що це найповільніша швидка швидкість заряду для MAX712, а також тому, що вона забезпечує найнижчу розсіювану потужність силового PNP-транзистора, а отже, меншу площу.

2.5.1. DC-DC перетворювач постійного струму

Перетворювачі постійного струму є важливими електронними схемами, які відіграють вирішальну роль у сучасних системах керування живленням. Їх основною функцією є перетворення напруги джерела постійного струму (DC) з

					123.KI-41.08	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одного рівня на інший, забезпечуючи стабільну та ефективну подачу електроенергії до різних електронних пристроїв і систем. У програмах, де рівні вхідної напруги можуть коливатися через такі фактори, як розряд батареї з часом або зміни умов навантаження, перетворювачі постійного струму підтримують постійну вихідну напругу, забезпечуючи надійне живлення компонентів системи. Однією з суттєвих переваг перетворювачів DC-DC є їх чудова ефективність перетворення потужності.

Використовуючи методи перемикування, вони можуть мінімізувати втрати потужності, пов'язані з резистивними елементами, такими як трансформатори або лінійні регулятори, які зазвичай виробляють тепло та витрачають енергію. Це призводить до кращої загальної ефективності та тривалого терміну служби батареї в портативних пристроях. Крім того, перетворювачі DC-DC пропонують гнучкість для підвищення або зниження рівнів напруги, дозволяючи ефективно керувати розподілом електроенергії в електронних системах. Вони також можуть забезпечувати гальванічну розв'язку, розділяючи вхідну та вихідну землю, щоб зменшити ризик заземлення та захистити чутливі компоненти від стрибків напруги та шуму.

Ще однією важливою особливістю перетворювачів постійного струму є точне регулювання напруги. Деякі перетворювачі можуть підтримувати точність вихідної напруги у вузькому діапазоні, як правило, з відхиленням менше 1%. Такий рівень точності життєво важливий для забезпечення належної роботи електронних пристроїв і систем, які вимагають стабільного живлення.

Перетворювачі постійного струму в постійний струм мають різні топології та конфігурації, що задовольняють широкий діапазон застосувань і вимог до потужності. Вони можуть бути розроблені як автономні пристрої, інтегровані у великі системи керування живленням або вбудовані в окремі компоненти, такі як мікропроцесори чи мікроконтролери.

Перетворювач DC-DC відповідає за живлення виходів +3,3 В і +5 В. Для виконання цього завдання необхідні два перетворювачі, MAX1674[9] і

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

MAX1703[10]. Перший — малопотужний перетворювач, який налаштований на вихід +3,3 В, а другий — потужний перетворювач, налаштований на вихід +5 В.

Оскільки для живлення мікроконтролера та модулів приймача GPS використовується +3,3 В, MAX1674 завжди ввімкнено. MAX1703 використовується для живлення модему GMSK, FM-передавача та радіочастотного підсилювача. Оскільки всі ці три модулі активні лише тоді, коли є дані про місцезнаходження для передачі, як показано в наступному розділі, вихід +5 В має бути активним лише 2 мс кожні 4 секунди, таким чином економлячи споживання енергії. MAX1703 вмикається, коли сигнал ON\ (PIN 16) низький, а коли сигнал ON\ високий, MAX1703 припиняє працювати та споживає найменший струм або 20 мкА.

2.5.2. Розрахунок ємності батареї(4.1.5.2.)

Щоб вибрати правильний акумулятор для цього застосування, ми повинні спочатку розрахувати необхідну ємність. Обговорення нижче детально описує бюджет потужності.

1. Приймач GPS: згідно зі специфікаціями, цей пристрій буде споживати максимальну потужність 130 мВт при +3,3 В у безперервному режимі зі швидкістю 1 фіксація на секунду, і це найбільше занепокоєння з точки зору енергоспоживання. Для струму навантаження 40 мА ефективність перетворення силового перетворювача MAX1674 становить 85%, але для консервативної конструкції використовується 70%.

$$C_{GPSUnit} = \frac{P * t}{\eta V} = \frac{0.130W * 15hours}{0.7 * 3.3} = 844mAh$$

2. Мікроконтролер: цей пристрій має два режими роботи: активний режим, коли споживається максимальна потужність, і режим сну, в якому споживається мінімальна потужність. Коли мікроконтролер перебуває в активному режимі, він споживатиме максимальний струм 2,8 мА при 3,3 В,

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

але, як згадувалося раніше, цей режим активний лише приблизно 2 мс, отже, вимога до струму в цьому режимі становить

$$C_{microMax} = \frac{i * t * t_{on}}{\eta T} = \frac{2.8mA * 15hours * 2ms}{0.7 * 4} = 30\mu Ah$$

де T (див. розділ 5.1.1) — це час між кожною передачею.

Більшу частину часу мікроконтролер працюватиме в режимі сну, де споживатиметься лише 3,4 мкА, тому поточна вимога в цьому режимі становить

$$C_{microMin} = \frac{i * t * t_{off}}{\eta T} = \frac{3.4\mu A * 15hours * (4 - 2ms)}{0.7 * 4} = 73\mu Ah$$

Тоді загальна потужність мікроконтролера становить 103 мкАг.

3. Модем GMSK, FM-передавач і радіочастотний підсилювач: ці модулі вимагають джерела живлення +5 В. Вони споживатимуть максимальну потужність лише тоді, коли є нові дані для передачі, що відбувається протягом 2 мс кожні 4 секунди. Коли немає даних для передачі, живлення +5 В від'єднується шляхом вимкнення DC-DC перетворювача MAX1703 IC (див. Додаток 1.D), у цьому стані лише MAX1703 споживає струм від батареї, що становить лише 20 мкА. У таблиці 3 показано максимальне споживання струму цих трьох модулів та їх периферійних пристроїв:

Таблиця 3. Максимальне споживання струму трьох модулів

	Modem CMX589A	25.6MHz Clock	U5 LM358	FM Transmitter RF2512	RF Amplifier RF2131
Максимальний струм (мА)	4	15	15	28	570

Загальний максимальний струм для цих трьох модулів становить 632 мА; при цьому струмі навантаження ефективність перетворення MAX1703 становить 65%,

але для консервативного дизайну використовується ефективність 50%, тому поточна вимога для активного режиму становить

$$C_{+5VMax} = \frac{i * t * t_{off}}{\eta T} = \frac{632mA * 15hours * 2ms}{0.5 * 4} = 9.5mAh$$

і для режиму сну є

$$C_{+5VMin} = \frac{i * t * t_{off}}{\eta T} = \frac{20\mu A * 15hours * (4 - 2ms)}{0.5 * 4} = 600\mu Ah$$

Додавши всі наведені вище цифри, загальне споживання струму становить приблизно 854,2 мАг, отже, одна батарея з поточною ємністю 900 мАг або 1000 мАг буде суфіксом. Дві батареї, які відповідають цій потужності, це HR-4/5AAUC (NiMH) і KR-1100AAU (NiCD), обидві виготовлені компанією Sanyo Inc. Розміри обох батарей наведено нижче в таблиці 4.

Таблиця 4. Розміри батарей

	Висота (мм)	Ширина (мм)
HR-4/5AAUC	43,0	14,2
KR-1100AAU	49,5	13,8

2.6. Реалізація блок-схеми

Основна програма (рис. 2.6.) складається з двох частин: ініціалізації та основного циклу. На етапі ініціалізації обчислюються параметри для портів, модулів і систем синхронізації. Процедура основного циклу виконується кожні 4 секунди, коли нова інформація про місцезнаходження доступна від приймача GPS. Після передачі нової інформації про місцезнаходження всі модулі, крім GPS-приймача, переходять у сплячий стан, де споживається мінімальна потужність.

Нижче описано функції кожної з підпрограм.

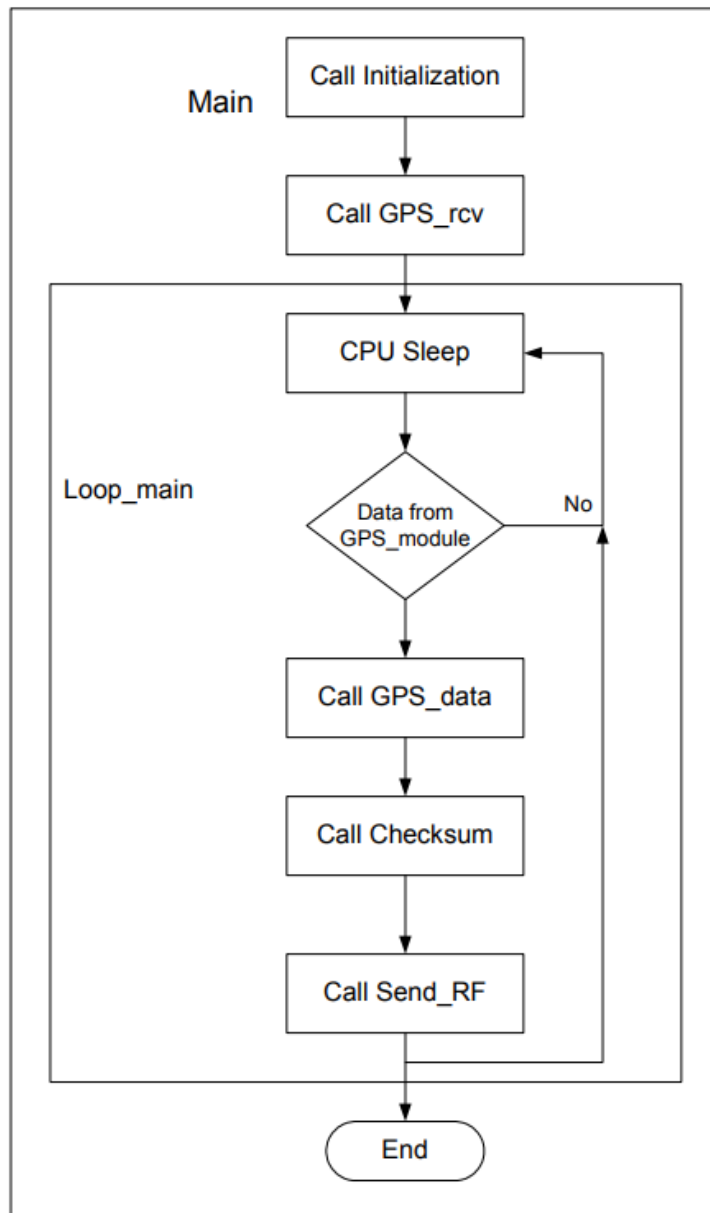


Рисунок 2.6. Логічна схема для основної процедури

<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОШКОВОГО РАДІОМАЯКА

3.1. Робота з приймачем передавачем RFM22-433 (прийом, передача, детектування частотних сигналів)

RFM22 побудований на однокристальному трансівері SI4432 забезпечує кілька режимів роботи, які можна використовувати для оптимізації енергоспоживання пристрою. Залежно від протоколу зв'язку системи можна досягти оптимального компромісу між часом пробудження радіостанції та споживанням енергії. Таблиця 5 підсумовує режими роботи RFM22. Загалом будь-який заданий режим роботи можна класифікувати як активний режим або режим енергозбереження. У таблиці вказано, які блоки увімкнено (активні) у кожному відповідному режимі. За винятком режиму вимкнення, усі можна динамічно вибирати, надсилаючи відповідні команди через SPI, щоб оптимізувати середнє споживання струму.

«X» у будь-якій комірці означає, що в заданому режимі роботи цей блок можна незалежно запрограмувати як увімкнено, так і вимкнено, без помітного впливу на поточне споживання. Блок схеми SPI включає інтерфейс SPI та регістровий простір. Блок схеми OSC 32 кГц включає RC-генератор 32,768 кГц або кристалічний генератор 32,768 кГц і таймер пробудження. AUX (допоміжні блоки) включає датчик температури, АЦП загального призначення та детектор низького заряду батареї[11].

					123.KI-41.08	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5. Режими роботи

Mode Name	Circuit Blocks								
	Digital LDO	SPI	32 kHz OSC	AUX	30 MHz XTAL	PLL	RA	RX	I _{VDD}
Shutdown	OFF (Register contents lost)	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	10 nA
Standby	ON (Register contents retained)	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	400 nA
Sleep		ON	ON	X	OFF	OFF	OFF	OFF	800 nA
Sensor		ON	X	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	1 μA
Ready		ON	X	X	ON	OFF	OFF	OFF	600 μA
Tuning		ON	X	X	ON	ON	OFF	OFF	9.5 mA
Transmit		ON	X	X	ON	ON	ON	OFF	27 mA*
Receive		ON	X	X	ON	ON	OFF	ON	18.5 mA

*Note: 27 mA at +11 dBm.

RFM22 спілкується з головним MCU через 3-провідний інтерфейс SPI: SCLK, SDI та nSEL. Головний MCU також може читати дані з внутрішніх регістрів на вихідному виводі SDO. Транзакція SPI — це 16-бітна послідовність, яка складається з біта вибору читання-запису (R/W), за яким слідує 7-бітне поле адреси (ADDR) і 8-бітне поле даних (DATA), як показано в рисунку 3.1. 7-бітне поле адреси підтримує читання або запис в один із 128 8-бітних керуючих регістрів. Біт вибору R/W визначає, чи є транзакція SPI транзакцією запису чи читання. Якщо R/W = 1, це означає транзакцію WRITE, тоді як R/W = 0 означає транзакцію READ.

Вміст (ADDR або DATA) закріплюється в RFM22 кожні вісім тактів. Параметри синхронізації для інтерфейсу SPI наведені в таблиці 6. Швидкість SCLK є гнучкою з максимальною швидкістю 10 МГц.

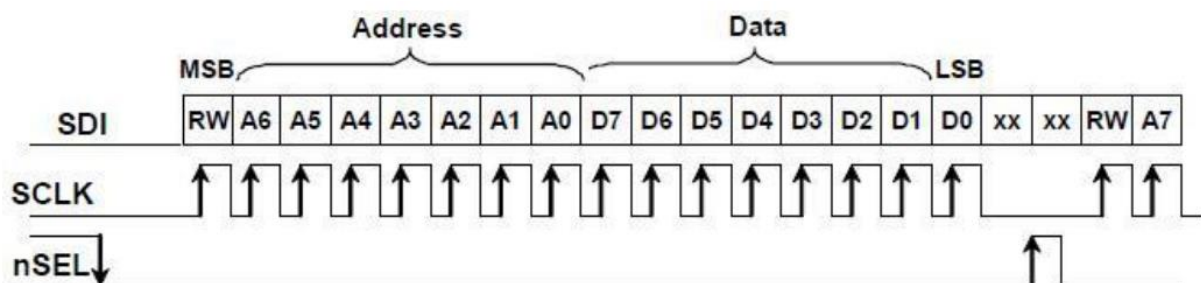


Рисунок 3.1. Час SPI

Таблиця 6. Параметри синхронізації послідовного інтерфейсу

Symbol	Parameter	Min	Diagram
t_{CH}	Clock high time	40	<p>The diagram shows the timing relationships between SCLK, SDI, SDO, and nSEL. Key parameters include: t_{SS} (Select setup time), t_{EN} (Output enable time), t_{CL} (Clock low time), t_{CH} (Clock high time), t_{DS} (Data setup time), t_{DH} (Data hold time), t_{DD} (Output data delay time), t_{SH} (Select hold time), t_{DE} (Output disable time), and t_{SW} (Select high period).</p>
t_{CL}	Clock low time	40	
t_{DS}	Data setup time	20	
t_{DH}	Data hold time	20	
t_{DD}	Output data delay time	20	
t_{EN}	Output enable time	20	
t_{DE}	Output disable time	50	
t_{SS}	Select setup time	20	
t_{SH}	Select hold time	50	
t_{SW}	Select high period	80	

Щоб зчитувати дані з RFM22, біт R/W повинен бути встановлений на 0, а потім 7-бітна адреса регістра, з якого потрібно зчитувати. 8-бітне поле DATA після 7-бітового поля ADDR ігнорується, коли R/W = 0. Наступні вісім негативних переходів фронту сигналу SCLK синхронізують вміст вибраного регістра. Дані, зчитані з вибраного регістра, будуть доступні на вихідному виводі SDO.

3.2. Апаратно-програмна розробка пошукового маяка

Апаратно пошуковий маяк побудований на основі мікроконтролера ATmega328, трансівера RFM22S та мікросхеми заряду літій-іонної батареї MCP73831 та опціонально GPS модуля з протоколом UART, наприклад M10Q-5883. Загальна принципова електрична схема пошукового маяка наведена на рис. 3.2. Також підтримується пезодинамік для подачі сигналу і яскравий білий світлодіод, що значно спроще пошук, зокрема у високій траві.

На основі принципової схеми спроектовано топологію друкованої плати, яка представлена на рис. 3.3.

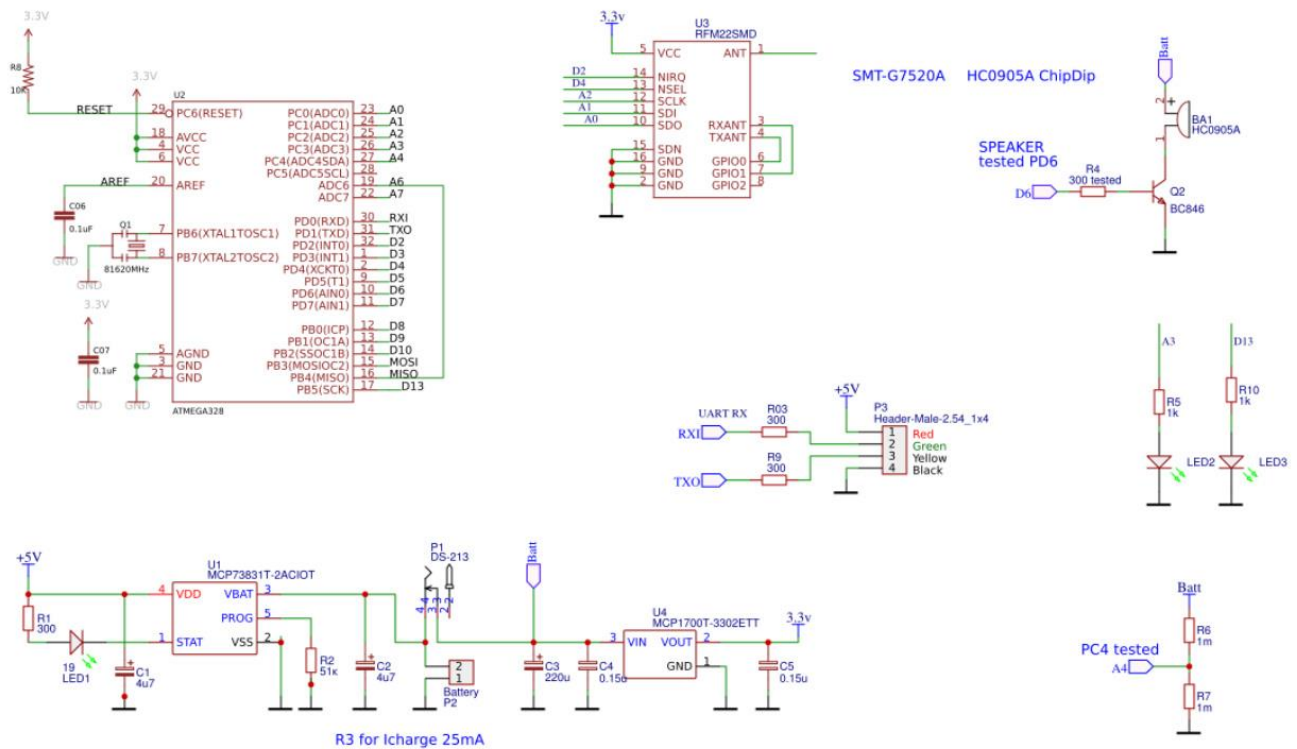


Рисунок 3.2. Загальна принципова електрична схема пошукового маяка.

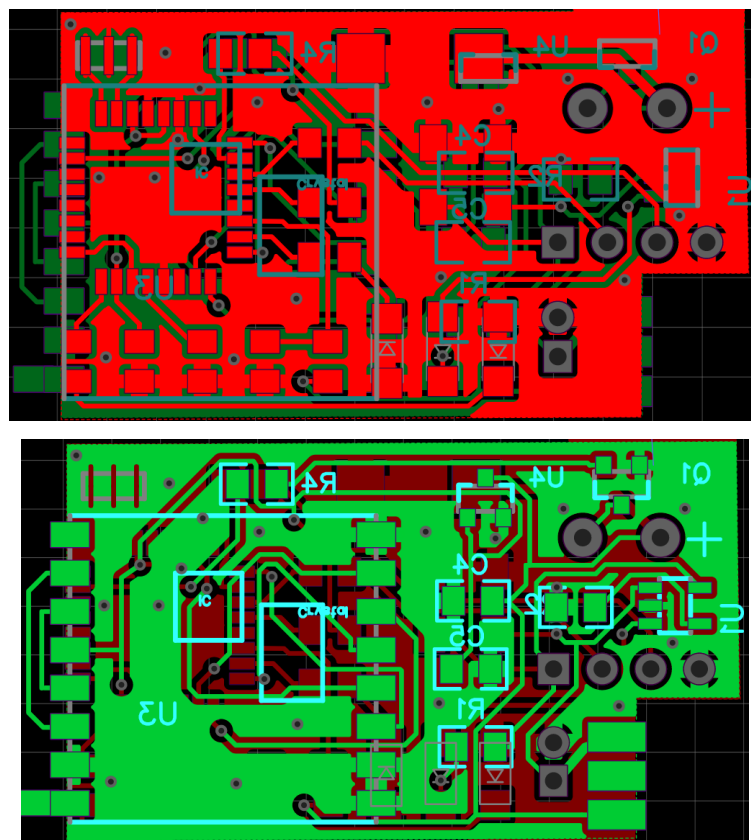


Рисунок 3.3. Топологія друкованої плати пошукового маяка

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Загальний вигляд прототипу пошукового маяка зображено на рис. 3.4. Розмір плати 20x38 мм, маса без GPS модуля 5,5 г.

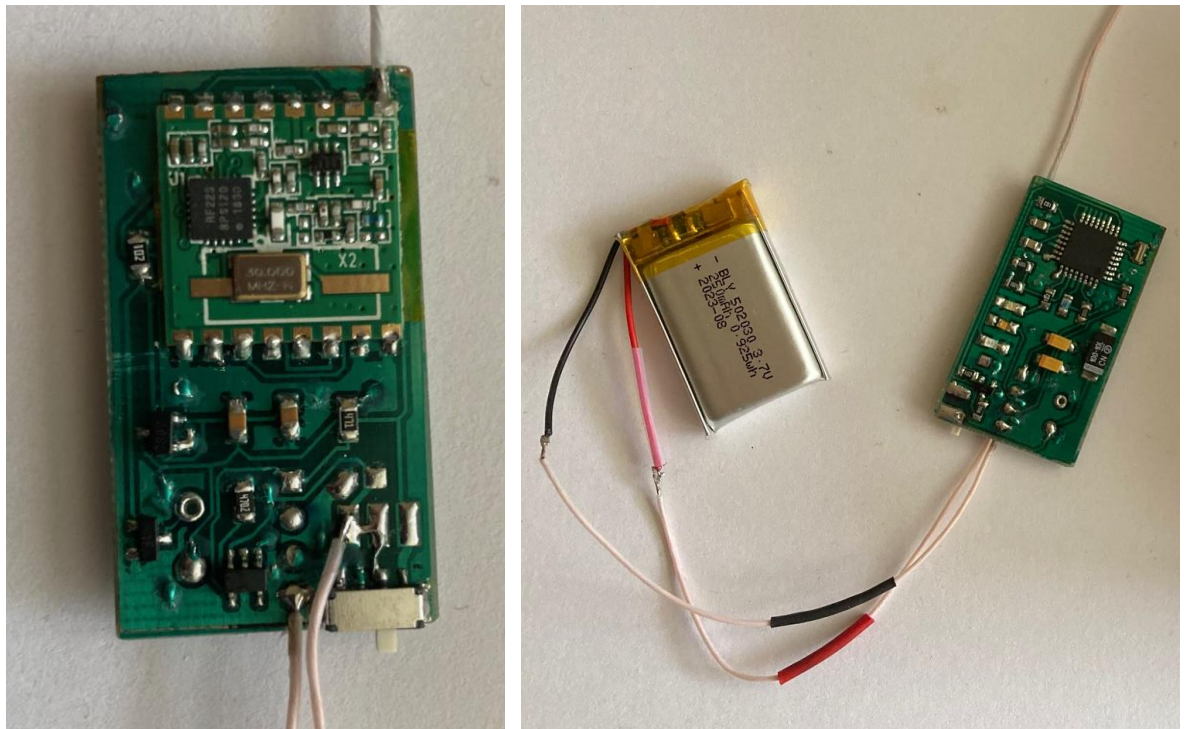


Рисунок 3.4. Загальний вигляд прототипу пошукового маяка

Програмна частина.

В режимі очікування радіомаяк ніяк не проявляє себе в ефірі. Трансівер знаходиться в режимі прийому на заданій частоті неліцензійного діапазону 413-460 МГц. Мікроконтролер в циклі опитує прийсач і очікує прийняття тону 1750 Гц, або іншого заданого в налаштуваннях. Отримавши даний сигнал виклику, мікроконтролер заміряє рівень сигналу прийому і переводить трансіввер в режим передачі. Передає голосом рівень сигналу, три тони різної потужності (для пошуку методом пеленгації), та якщо підключено GPS приймач то передає GPS координати. З GPS приймачем обмін даними відбувається через UART за протоколом NMEA. Якщо рівень прийому вище 80 %, тобто рація знаходиться близько вмикається звуковий сигнал та світлова сигналізація, що значно спрощує пошук втраченої моделі на деревах та в високій траві.

Для того щоб вмістити хоча б цифри озвучені голосом застосовано Адаптивну диференціальну імпульсно-кодову модуляція. ADPCM є різновидом

					123.KI-41.08	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

диференціальної імпульсно-кової модуляції. При цьому методі розмір кроку дискретизації варіюється, що дозволяє знизити необхідний бітрейт для певного співвідношення сигнал/шум. У телефонії стандартний звуковий сигнал телефонного дзвінка дискретизується за допомогою 8 000 значень за секунду (8 000 Гц), по 8 біт кожне, що дає бітрейт 64 кбіт/с, такий сигнал відомий як DS0. У випадках коли прийнятні втрати якості звуку, іноді сенс стискати голосовий сигнал ще сильніше. Алгоритм ADPCM використовується для проектування послідовності з 8 біт PCM семплів в послідовності 4-бітових семплів ADPCM. Таким чином, пропускна здатність лінії збільшується вдвічі.

Розроблений радіомаяк вигідно відрізняється від альтернативних рішень відсутністю прив'язки до зони покриття мобільних операторів зв'язку, малою вагою та габаритами, а також наявністю кількох режимів пошуку: за координатами GPS, пеленгом радіосигналу, режимом Proximity. Для пошуку в ближній зоні маяк оснащений гучним звуковим сигналом та яскравим світлодіодом.

Оскільки радіомаяк не вимагає наявності стільникових операторів то для взаємодії з маяком необхідна рація діапазону 413-460 МГц, що підтримує видачу в ефір викликового тону Tone burst (звуковий сигнал частотою тону 1750 Гц). З поширених та доступних моделей Baofeng UV-3R, Baofeng UV-5R, Quansheng UV-K5, Yaesu та інші.

Пошук маяка може здійснюватися кількома способами:

1. Шляхом навігації в точку, координати якої маяк повідомляє або голосом, або цифровому в DTMF кодуванні;
2. За допомогою радіопеленгації у тому випадку, якщо маяк не підключений до GPS або GPS з якихось причин відмовив;
3. Використовуючи режим пошуку Proximity, який по суті є покращеним режимом радіопеленгації;
5. У безпосередній близькості від маяка можна активувати сирену та спалах для полегшення ближнього пошуку (наприклад, у снігу, високій траві тощо).

Якщо GPS відмовив вже після аварії, то маяк запам'ятає останні коректні координати і використовуватиме лише їх.

					123.KI-41.08	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після прийому тону виклику маяк дасть відповідь в наступному порядку:

- 1) повідомляє рівень викликового сигналу;
- 2) активує сирену та спалах і рівень сигналу перевищив відповідний поріг;
- 3) передає три тони спадної потужності 100 мВт, 13 мВт, 1.3 мВт;
- 4) передає поточні координати, якщо GPS модуль підключено;

Цикл повторюється три рази.

Можливі варіанти вдосконалення пошукового маяка. Ідея використання ретранслятора впливає з фізики поширення радіохвиль, та поняття радіогоризонту. Дальність радіозв'язку в діапазоні ультракоротких хвиль обмежена прямою видимістю між приймачем і передавачем. Враховуючи кривизну поверхні Землі, та наявні перешкоди пряма видимість зникає вже з відстанню між маяком, якщо він лежить на землі і радією приблизно через 4 км.

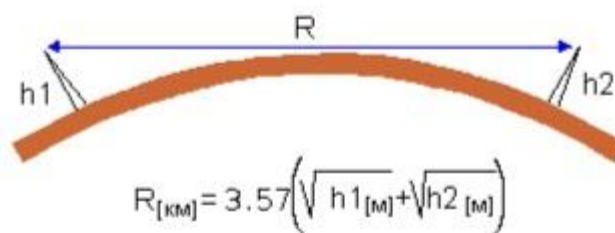


Рис. 3.5. Обмеження дальності радіозв'язку виклекане кривизною землі.

Але, якщо одну з антен підняти вище над землею, то, дальність зв'язку суттєво збільшується. Тому, якщо на руках літальний апарат і другий маяк який підтримуватиме функцію ретранслятора, то можна знаходячись у вихідній точці, підняти маяк-ретранслятор на дроні на висоту, або у напрямку передбачуваної точки падіння, звідки він викличе втрачений маяк і передасть на землю його координати або рівень сигналу.

3.3. Вимірювання потужності шуму та дальності

Усі вимірювання проводилися з передавачем і приймачем, налаштованими на 915 МГц, що знаходиться поблизу центральної частоти діапазону ISM. Рисунок

					123.KI-41.08	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 ілюструє налаштування вимірювання для вимірювання частоти бітових помилок (BER) на приймачі для різних рівнів вхідної потужності.

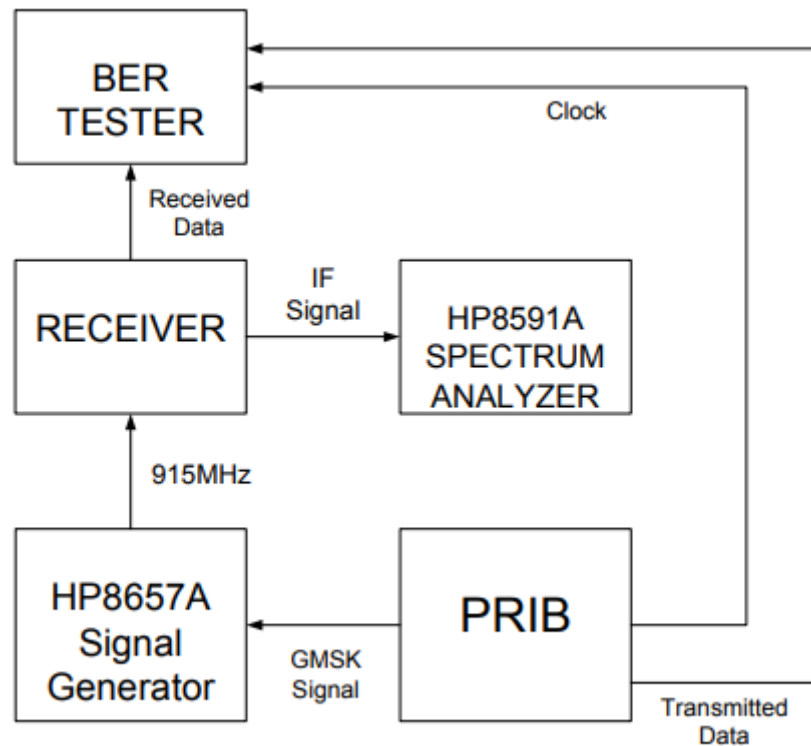


Рисунок 3.6. Налаштування вимірювання

Важливо відзначити, що на виході блоку PRIB є базовий сигнал GMSK, який використовується для модуляції вбудованого FM-передавача генератора сигналів HP8657A. Причина цього полягає в тому, що вихідну потужність HP8657A можна легко змінити, заощаджуючи таким чином час.

Потужність шуму вимірюється за допомогою основних принципів потужності сигналу та лінійних приймачів. Для двох незалежних сигналів сумарна потужність є просто сумою двох незалежних сигналів. Для лінійних приймачів сума двох рівних потужностей сигналу буде на 3 дБ вище потужності одного сигналу. Вимірювальна установка для вимірювання потужності шуму показана на малюнку 6.1. Для цього вимірювання смуга роздільної здатності HP8591A встановлена на 180 кГц, що є смугою пропускання двох фільтрів ПЧ приймача[12].

Щоб виміряти потужність шуму приймача, слід виконати наступні кроки:

- а. Використовуйте аналізатор спектру, щоб виміряти потужність вихідного сигналу ПЧ, коли RF Out генератора сигналів вимкнено.

б. РЧ-вихід генератора сигналів увімкнено на рівні -130 дБм, що є мінімальною вихідною потужністю генератора сигналів.

в. Збільшуйте потужність вихідного радіочастотного сигналу, доки вихідний сигнал ПЧ не стане на 3 дБ більшим за рівень, коли генератор сигналів був вимкнений.

Припускаючи, що потужність генератора сигналу та потужність шуму є незалежними сигналами, потужність шуму приймача дорівнює вихідному рівню генератора сигналу, вимірюваному на кроці с, мінус будь-які втрати в кабелі (-2 дБ). Виконавши описані вище кроки, вимірювана потужність шуму приймача становить -107 дБм щодо вхідного порту (термінали антени) приймача.

Відомо згенерований бітовий рядок передається на відомому рівні потужності. Цей рівень потужності можна змінити так, щоб можна було створити графік BER для різних відношень сигнал/шум (SNR). BER обчислюється шляхом поділення кількості бітів, отриманих із помилкою, на кількість переданих бітів.

$$\text{BER} = \text{Біти з помилкою} / \text{Загальна кількість отриманих бітів}$$

Через відсутність обладнання для тестування BER спочатку був розроблений блок тестера BER, показаний на рисунку 3.6. На рисунку 3.7. показана схема пристрою, що використовується для вимірювання BER.

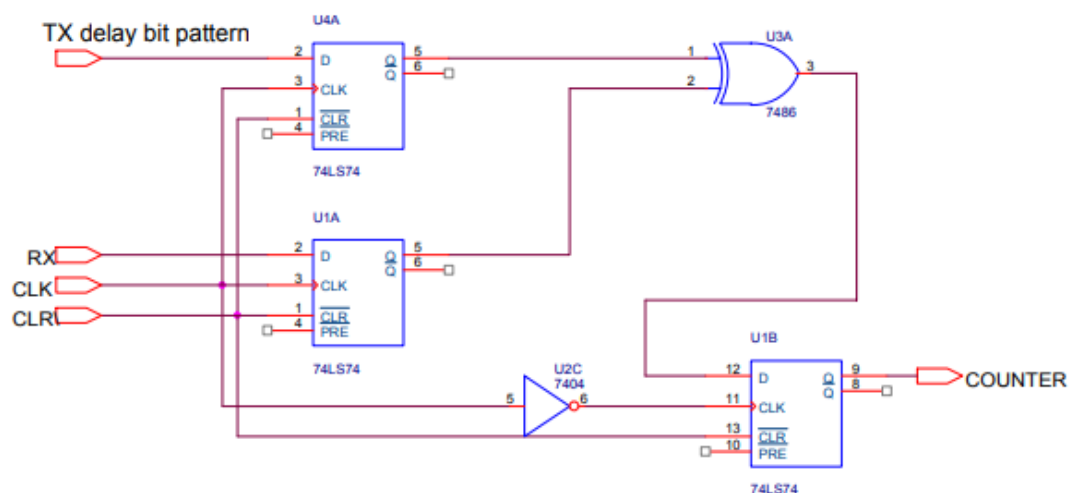


Рисунок 3.7. Схема тестера BER

Схеми передачі та прийому вводять часову затримку в декілька бітів. Переданий бітовий шаблон затримується на належну кількість, щоб відповідати отриманому шаблону в часі; за фактичними вимірюваннями ця затримка становить

близько 4 бітів, як показано на рисунку 3.8.. Якщо біти однакові на вході вентиля XOR, на виході ЛІЧИЛЬНИК низький. Якщо вони різні, вихідний ЛІЧИЛЬНИК стає високим, викликаючи лічильник подій з бітовою помилкою. Шаблон затримки біта TX генерується мікроконтролером PRIB і є точною копією переданих даних, але із затримкою на чотири біти.

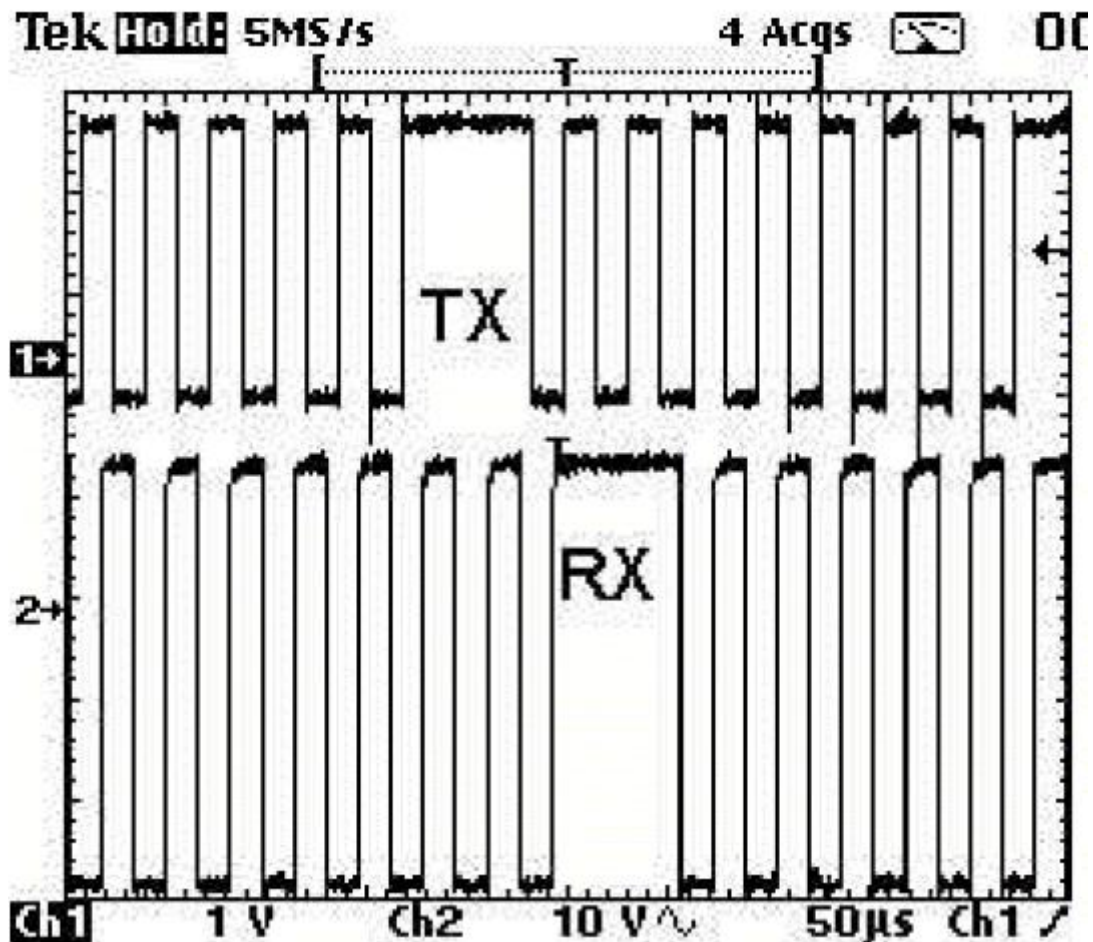


Рисунок 3.8. Затримка між переданими цифровими даними та отриманими даними для входного рівня -90 дБм і швидкості передачі даних 64 Кбіт/с.

Таблиця 7 показує BER для різних рівнів входної потужності. Щоб виконати це вимірювання, мікроконтролер PRIB було запрограмовано на виведення кількості бітів $10/BER$. Це робиться для того, щоб помилка E_b/N_0 була меншою за 0,5 дБ.

Таблиця 7. Залежність BER приймача від SNR

RX Power (dBm)	S/No (dB)	BER
-102	5	1.00E-01
-101	6	5.00E-02
-100	7	2.00E-02
-99	8	1.00E-02
-98	9	5.00E-03
-97	10	3.00E-03
-96	11	8.00E-04
-95	12	3.00E-04
-94	13	5.00E-05
-93	14	3.00E-05
-92	15	5.00E-06
-91	16	3.00E-06

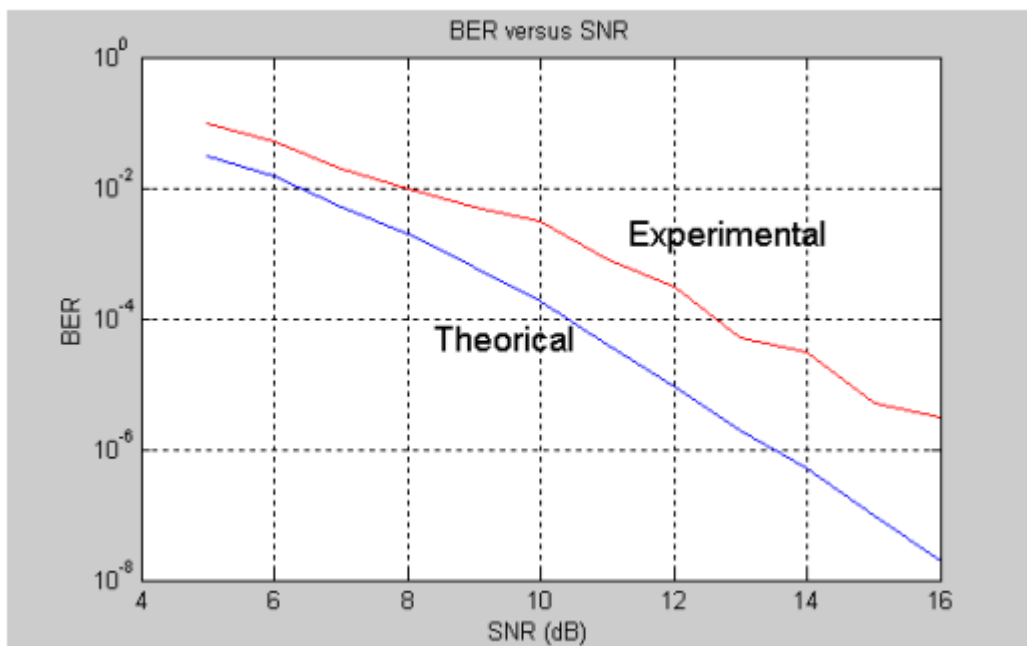


Рисунок 3.9. Залежність BER від SNR, виміряного на виході модему GMSK CMX589A

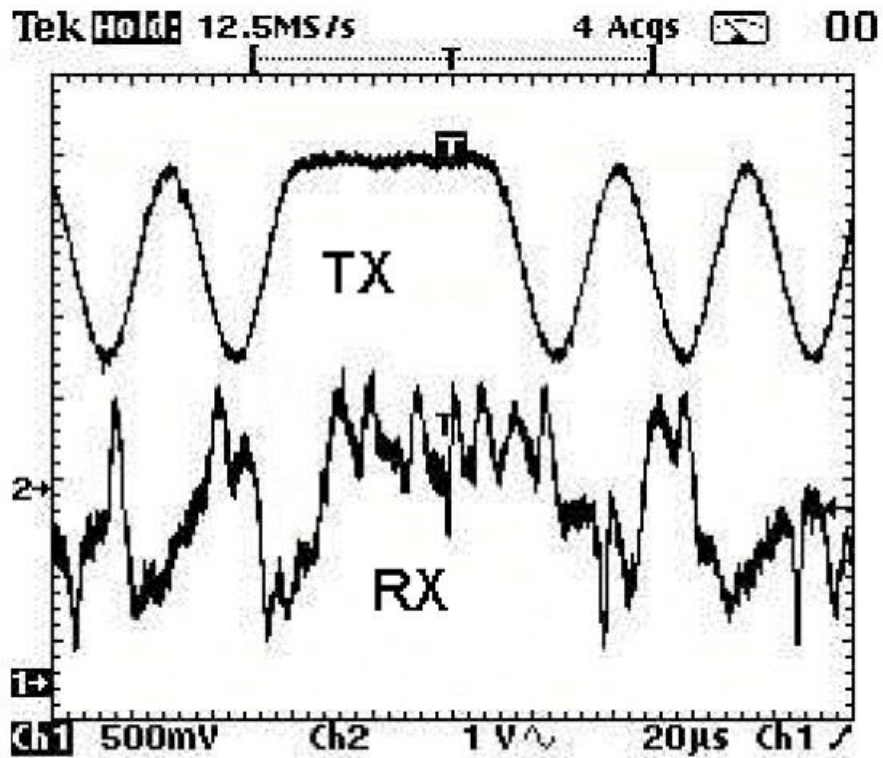


Рисунок 3.10. Переданий і прийнятий сигнал GMSK для вхідного рівня -102 дБм і швидкості передачі даних 64 Кбіт/с

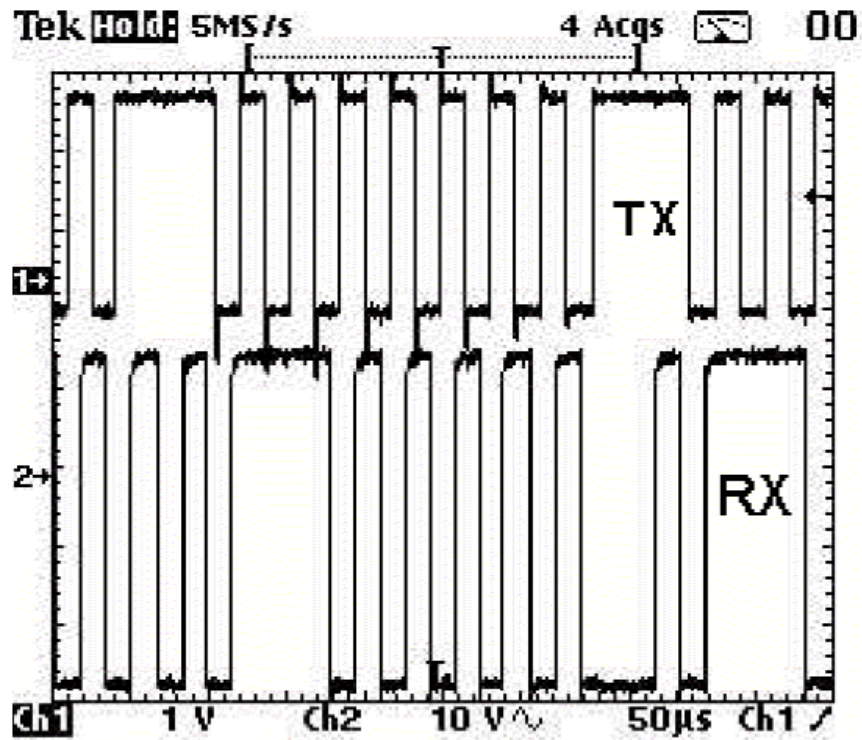


Рисунок 3.11. Передані та відновлені цифрові дані для рівня вхідного сигналу - 102 дБм і швидкості передачі даних 64 Кбіт/с

Як показано на малюнку 3.9, різниця між очікуваним і експериментальним BER становить приблизно 2 дБ. Причина цього полягає в тому, що виміряна потужність шуму приймача занадто висока (–107 дБм). Відповідно до таблиці даних приймача, для рівня вхідної потужності –101 дБм, SNR має становити 8 дБ при температурі 25°C і смузі пропускання 180 кГц, отже, потужність шуму приймача повинна бути близько –109 дБм, що чітко пояснює 2 дБ. різниця між експериментальним і очікуваним BER. На рисунках 3.10 і 3.11. показано передані та отримані дані GMSK, а також переданий і відновлений цифровий рядок відповідно; зверніть увагу на те, наскільки зашумлена форма хвилі та бітові помилки.

Результати експерименту показують, що неможливо досягти специфікації BER 10-4 на відстані 40 км. Як показано на малюнку 3.9., для досягнення BER 10-4 потрібне SNR 13 дБ, отже, потрібен рівень вхідної потужності принаймні –94 дБм. Використовуючи цю цифру, нова максимальна відстань становить лише 26 км. Щоб досягти максимальної відстані 40 км, необхідно використовувати приймач з вищою чутливістю або передавати на вищому рівні потужності.

					123.KI-41.08	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Розглянуто існуючі системи пошуку та позиціонування, технології передачі даних, таких як: GSM GPRS 3G, LORA показано їх переваги та недоліки, а також описано системи пошуку за допомогою радіопеленгації.

Проаналізовано вимоги до апаратного забезпечення, яке використовуватися для роботи пошукового маяка. Обґрунтовано вибір кожного із основних компонентів і пояснено його функцію. Показано, що розроблена система може служити основою для проектування подібних систем радіопеленгації. При подальшому розвитку можуть бути використані більш досконалі та більш придатні пристрої.

Розроблено проект і реалізацію невеликого, енергоефективного та економічно вигідного пошукового радіомаяка. Показано, що підхід із використанням мікроконтролера з низьким енергоспоживанням і трансівера RFM22 на сичтемі на кристалі SI4432 із кількома дискретними компонентами забезпечує прийнятну продуктивність і тривалий час автономної роботи.

					123.KI-41.08	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. R. M. Page, "The Origin of Radar," Greenwood Press, Publishers Westport, Connecticut, 1979
2. M. Kayton and W. Fried, "Avionics Navigation Systems," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.
3. S. S. Swords, "Technical History of the Beginnings of Radar," Peter Peregrinus Ltd., London, 1986.
4. "uTracker02 rev Interface board for iTRAX02 GPS Receiver Module," Fastrax, September 2001.
5. "CMX589A, GMSK Modem," CML Microcircuits, 2002.
6. <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-atmega328.html>
7. "RF2512 UHF Transmitter," RF Micro-devices, Rev B11 020320.
8. "MAX712 NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers," Maxim-ic, Rev 5, April 2002.
9. "MAX1674 High-Efficiency, Low-Supply-Current, Compact, Step-Up DC-DC Converters," Maxim-ic, Rev 3, April 2000.
10. "MAX1703 1-Cell to 3-Cell, High Power (1.5A), Low-Noise, Step-Up DC-DC Converter," Maxim-ic, Rev 2, April 1998.
11. <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/RFM22.pdf>
12. "RF2917 433/868/915MHZ FM/FSK RECEIVER," RF Micro-devices, Rev B2 010118

					123.KI-41.08	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		