

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни

«Загальні знання дистанційно пілотованих суден:

Схемотехніка безпілотних літальних апаратів»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 3 – Апаратура радіокерування

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист
Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Комплект апаратури радіокерування.
2. Функція Failsafe.
3. Модуляція сигналу PPM.
4. Формат сигналів PCM.
5. Сумісність апаратури стандартів DSM2/DSMX.
6. Сполучення приймача та передавача (біндинг).
7. Імпульси PWM, тримери та субтримери.
8. Витрати та експоненти.
9. Конвертер PPM-EiM.
10. Приймач-сателіт.
11. Вбудована телеметрія.
12. Антени.
13. Системи стеження за напрямком.
14. Диверсифікація антен.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) / КНТ, 2023. – 126 с.
2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ “КОМАНДИРУ ПІДРОЗДІЛУ ПО ЗАСТОСУВАННЮ БпАК ТАКТИЧНОГО РІВНЯ” (за досвідом проведення ООС (раніше АТО), О.О. Павлишен (керівник розробки), Г.М. Тимчук, Т.В. Цокур, 2018. – 72 с.
3. UAV Based Remote Sensing, Volume 2, Special Issue Editors Felipe Gonzalez, Toro Antonios Tsourdos, 2017. – 406 p.
4. Aircraft General Knowledge 2 - Electrics and Electronics - 2014

Допоміжна література:

1. Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment / Reg Austin. This edition first published 2010. – 365 p.
2. Theory, design, and applications of unmanned aerial vehicles / A. R. Jha. Boca Raton, FL : CRC Press / Taylor & Francis Group, [2016]. 317 p.
3. SMART AUTONOMOUS AIRCRAFT Flight Control and Planning for UAV. Yasmina Bestaoui Sebbane, Université d'Evry, France. 2016 by Taylor & Francis Group, LLC – 434 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_ua_dynamics_brochure.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_ua_dynamics_brochure.pdf)
2. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf)
3. <https://defence-ua.com/tags/389/>

Текст лекції

1. Комплект апаратури радіокерування.

Комплект апаратури радіокерування — це найчастіше найдорожчий компонент радіокерованої системи. Але заощаджувати на ньому вкрай небажано. У радіоапаратуру обов'язково має бути закладена можливість розвитку конструкції вашого квадрокоптера, інакше миттєва економія може обернутися додатковими витратами через один-два роки. Причому керування квадрокоптером високо піднімає планку мінімальних вимог порівняно з літаками та навіть вертольотами.

У випадку апаратура радіоуправління складається з пульта радіоуправління (передавача) і приймача. Основними параметрами є протокол кодування сигналу та кількість каналів передачі команд. Робочу частоту ми не розглядаємо, тому що в даний час практично вся апаратура працює на частоті 2,4 ГГц, і інші варіанти швидше відносяться до екзотичних явищ, хоча при далеких польотах по ГРУ застосовується і апаратура з робочими частотами 40 і 72 МГц, сигнали яких менше схильні до згасання та інтерференції на складних рельєфах. Протокол кодування сигналу означає спосіб, яким команди, отримані з органів управління пульта, "упаковані" потоком даних, що проходить через радіоканал. При розробці протоколів керуються завадостійкістю та щільністю потоку інформації. Існують як пропрієтарні протоколи, які використовує лише один виробник апаратури, так і масовіші. Кожен з них має свої переваги та недоліки.

Детальний розбір та аналіз протоколів навряд чи доречний у книзі для початківців. На першому етапі протокол як такий взагалі не матиме значення. Загостримо вашу увагу лише на тому, що протокол передавача та протокол приймача мають бути однаковими. Це здається очевидним, але через неуважність цілком можна купити невідповідний приймач. Наприклад, якщо ваш передавач працює з протоколами DSM2/DSMX, потрібно шукати приймач для цих протоколів. Існують передавачі зі змінними модулями, що передають, а також підтримують різні протоколи. Це особливо зручно, коли треба придбати передавач, сумісний з квадрокоптером заводського виготовлення, що вже є, або різними приймачами.

Параметр, який важливо, — кількість каналів. Для управління квадрокоптером їх потрібно щонайменше чотири:

- загальний газ (Throttle);
- тангаж (вперед-назад, Pitch);
- крен (вправо-вліво, Roll);
- нишпорення (обертання в площині польоту, Yaw).

Насправді цього дуже мало і вистачить вам лише для пробного зльоту. По-перше, потрібні канали для управління включенням сенсорів та режимів польотного контролера. Наприклад, утримання висоти за барометром, увімкнення/вимкнення компаса, утримання позиції або повернення додому по GPS. По-друге, можуть знадобитися канали для управління бортовою

відеокамерою, бортовими вогнями або включення системи пошуку апарата, що впав. Комфортне керування квадрокоптером починається при восьми та більше каналах. Благо, зараз навіть недорогі передавачі та приймачі здатні підтримувати до 14 каналів. Кількість каналів приймача та передавача не обов'язково має співпадати. Якщо передавач підтримує дванадцять каналів, а приймач вісім, то у вашому розпорядженні лише вісім каналів, інші будуть недоступні.

Отже, пульт радіокерування складається з аналогових (стіки) та дискретних (перемикачі та тумблери) органів управління, мікроконтролера, який оцифровує та кодує сигнали органів управління, радіопередаючої частини, дисплея та батареї живлення. Як додаткові модулі можуть бути приймач-декодер сигналів телеметрії та дисплей для відображення даних телеметрії та сигналу з бортової відеокамери. Завдяки наявності мікроконтролера більшість пультів підтримує гнучкі налаштування, що дозволяють довільно встановлювати зв'язок між каналом і органом управління, інвертувати сигнал і встановлювати коефіцієнт пропорційності між відхиленням стика і зміною сигналу, а також змінювати кількість каналів та інші параметри потоку даних.

Залежно від розташування стиків управління розрізняють передавачі типу Mode 1 і Mode 2. У передавачів першого типу зліва розташований стик Pitch-Roll, а праворуч Throttle-Yaw. У передавачів другого типу, відповідно, навпаки. Більш масовими є передавачі типу Mode 2, тому що більшості користувачів правої психологічно зручніше інтенсивно керувати положенням літального апарату правою рукою, а лівою періодично регулювати газ. Це питання суто особистого комфорту та звички.

До вибору розташування стиків при покупці слід поставитися дуже відповідально, тому що недостатньо змінити призначення стиків у меню або переключити дроти в пульті. Вузли правого та лівого стиків мають різну конструкцію. Стик Pitch-Roll підпружинений за двома напрямками і при відпусканні повертається до центральної позиції. Стик Throttle-Yaw підпружинений тільки по осі Yaw, а газ при відпусканні стіку не йде в центр. Тому для переробки Mode 1 в Mode 2 чи навпаки необхідно поміняти місцями вузли стиків або переставити деталі цих вузлів. Не для кожного пульта можливо.

Важливо, щоб фабрична якість пульта відповідала вашим потребам на перспективу. Дешевим пультам китайських виробників притаманні люфти механічної частини, мала зносостійкість та низька якість змінних резисторів вузла стиків, висока похибка оцифрування положення стиків. Внаслідок низької якості пульта можуть виникнути негативні явища.

- Джиттер - "тремтіння" значення керуючого сигналу при нерухомому стіку. Джиттер виникає як сума похибок оцифрування, кодування передавача і зворотного розкодування в приймачі.

- Температурний дрейф — значення сигналів, що управляють, зсуваються вгору або вниз на певну величину при зміні температури пульта. Відповідно, в нейтральному положенні стиків управляючі сигнали перестають бути

нейтральними. У дешевій апаратурі дрейф іноді буває настільки сильним, що заважає перемикати режими та керувати квадрокоптером у зимовий час. Примірники однієї і тієї ж марки з різних партій можуть бути по-різному схильні до дрейфу. Для перевірки рекомендується охолодити пульт у холодильнику до -10...-15 градусів та перевірити параметри сигналу. Це можна зробити за допомогою спеціальних програм для комп'ютера або смартфона, про які ми розповімо далі.

- Дискретність — значення сигналів, що управляють, при зміщенні стику змінюються не плавно, а стрибками. Це заважає точному пілотуванню добре налаштованого апарату. Зрозуміло, цифровий сигнал визначення змінюється дискретно, проте в якісній апаратурі з високою розрядністю дискретизації крок зміни невеликий і не заважає точному пілотуванню. Розмір дискретності також впливає джиттер.

Для управління мультикоптерами початкового та середнього рівня не потрібні будь-які спеціальні приймачі. Підійде будь-який, сумісний із наявним пультом, приймач із числом каналів від шести і більше. Чотирьохканальний приймач підійде тільки для першого включення та пробних зльотів, далі кількості каналів швидко стане недостатньо.

2. Функція Failsafe.

При раптовому зникненні керуючого сигналу внаслідок досягнення граничної дальності, ефірної перешкоди або поломки апаратури, система радіокерування повинна відпрацювати один із варіантів поведінки:

- або зберегти останні прийняті значення сигналів, що управляють;
- або встановити значення управляючих сигналів у деякі заздалегідь задані значення.

Перший варіант досить небезпечний для тривалого захисту: якщо в момент втрати керування апарат переміщався з великою швидкістю або набирив висоту, то він продовжить це робити і може відлетіти дуже далеко і безнадійно загубитися або завдати шкоди оточуючим. Тому такий варіант захисту вбудований у логіку роботи цифрового приймача та автоматично спрацьовує при короткочасному випаданні кількох пакетів даних.

Другий варіант безпечніший, краще підходить при тривалому пропаданні сигналу і дозволяє реалізувати різні алгоритми для мінімізації шкоди. Стосовно квадрокоптера реалізація залежить від комплектації.

- Без GPS-навігації. Сигнал газу виставляється в положення, що відповідає досить швидкому, але безпечному зниженню, щоб коптер не забрало далеко вітром, а збитки від падіння були мінімальними. Сигнали керування положенням виставляються в середнє положення (горизонталь), включається режим автостабілізації горизонту. Режим утримання висоти барометром відключається, або включається режим утримання мінімальної висоти, коли коптер зависає не нижче заданого значення. Рекомендується також задати повільне обертання Yaw, щоб положення приймальної антени змінювалося в просторі. Це дає шанс у якомусь положенні прийняти нестійкий сигнал і

повернути управління. Якщо є пошуковий маячок, увімкніть його. У результаті при спрацьовуванні Failsafe коптер повинен зупинитися, вирівнятися і безпечно приземлитися.

- За наявності GPS-навігації. Сигнал газу виставляється в положення, що відповідає висіння. Сигнали керування положенням виставляються в середнє положення (горизонталь), включається режим автостабілізації горизонту. Вмикається функція "повернення додому". Включається барометр, у прошивці контролера має бути задане значення висоти, де відбувається повернення до точки старту, і висоти, де квадрокоптер зависає після повернення. Наприклад, якщо політ може відбуватися над лісом, то квадрокоптер повинен повертатися, гарантовано пролітаючи вище за найвищі дерева. У результаті, при спрацьовуванні Failsafe квадрокоптер повинен сам повернутися до місця старту і зависнути на заданій висоті.

Навіть якщо ви не плануєте автоматичні польоти по заданому маршруту, наявність приймача GPS дуже корисна з точки зору збереження квадрокоптера. А якщо ви збираєтеся використовувати дорогу відеокамеру в комплекті з безколекторним гіропідвісом та якісним відеопередавачем, то приймач GPS є обов'язковим пристроєм, оскільки саме він поверне вам обладнання загальною вартістю понад тисячу доларів у разі втрати керування.

Функція Failsafe може бути реалізована як приймачем, так і польотним контролером. Що краще? Краще не лінуватися і налаштувати обидва варіанти. Імовірність раптової та повної відмови приймача під час польоту невелика, але не дорівнює нулю. У разі повної відмови приймача функцію Failsafe реалізує польотний контролер. Деякі приймачі немає вбудованого захисту від втрати зв'язку, у разі вся надія лише з контролер.

3. Модуляція сигналу PPM.

Звичайний багатоканальний приймач отримує радіоканалу кодований послідовний сигнал управління, декодує його і "розкладає" по окремих виходах приймача для кожного каналу. Параметри сигналу на виході індивідуального каналу визначаються єдиним стандартом і не залежать від типу кодування в передавачі або марки виробника. Статті на тему популярних стандартів кодування в апаратурі радіоуправління писали або перекладали всі, кому не ліньки. У тому числі й люди, далекі від радіотехніки, що породило неабияку смислову та термінологічну плутанину. Давайте розберемося по порядку.

Стандарт кодування PPM (Pulse Position Modulation – фазово-імпульсна модуляція) дуже старий і популярний, оскільки може формуватися та оброблятися без використання мікроконтролерів, за допомогою звичайних інтегральних лічильників та таймерів. Зараз нечасто можна зустріти передавач із класичною модуляцією сигналу PPM, хіба що у китайських іграшках з інфрачервоним пультом, але ми розберемо цей стандарт докладно. Адже яким би способом зараз не передавали інформацію по радіоканалу, на виході декодера звичайного приймача ми маємо імпульси радіоуправління з певними параметрами, які історично походять від PPM і не змінюються для забезпечення

сумісності між кінцевим (керованим) обладнанням і масовою радіоапаратурою різних виробників.

Отже, звернемося до рис. 1, на якому схематично зображено стандартний сигнал PPM для чотирьох каналів.

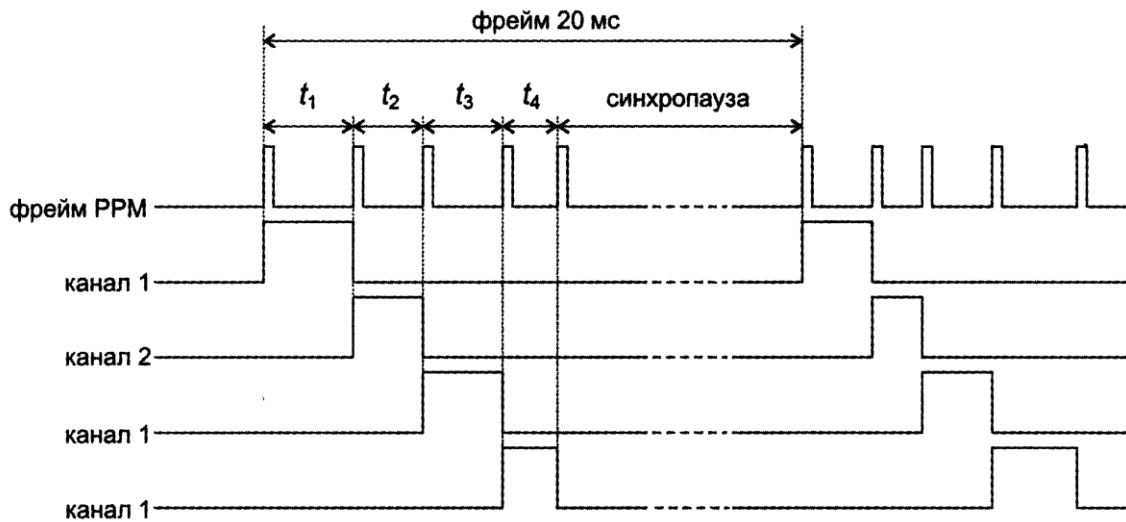


Рисунок 1. Сигнал PPM та його розкладка каналами управління

Сигнал PPM складається з кадрів (frame) тривалістю 20 мс. У свою чергу, кадр складається зі стробуючих імпульсів, які поділяють канали, і синхропаузи, завдяки наявності якої приймач починає очікувати наступний кадр. Як видно з діаграми, відстань t_x між фронтами сусідніх синхроімпульсів відповідає тривалості імпульсу в каналі приймача. Тобто, можна сказати, що сигнал PPM інформація каналу міститься в положенні (position) стробуючого імпульсу щодо початку кадру або попереднього строба. Тривалість стробуючих імпульсів лежить у діапазоні 100-400 мкс.

За допомогою синхропаузи приймач пізнає початок наступного кадру, потім, спираючись на стробуючі імпульси, розподіляє імпульси керування каналами. Для надійного поділу кадрів тривалість синхропаузи повинна бути не менше 2500 мкс. В іншому випадку приймач може не впізнати початок наступного кадру та відправити на виходи каналів непередбачувані імпульси.

У свою чергу, імпульси на виході окремого каналу йдуть з періодом 20 мс (тобто з частотою 50 Гц), і змінюється їх ширина. Таке кодування інформації називають PWM (Pulse Width Modulation) або ШІМ (широтно-імпульсна модуляція). Іншими словами, у приймачі сигнал PPM перетворюється на розділені каналами сигнали PWM. Саме ці імпульси PWM ми досі отримуємо на каналних виходах приймачів, навіть найсучасніших. Виняток становлять приймачі з послідовним вихідним каналом, але це пізніше.

Оскільки саме тривалість імпульсу в каналі містить інформацію, параметри цього імпульсу стандартизовані: мінімальна — 1000 мкс, середня — 1500 мкс, максимальна — 2000 мкс. Обов'язково запам'ятайте діапазон цих значень, вони фігурують у налаштуваннях квадрокоптера і стануть вам у нагоді. Виробники апаратури дозволяють встановити в налаштуваннях більш широкий

діапазон значень, близько 800-2200 мкс, але в квадрокоптерах такі значення зазвичай не застосовуються.

У стандартний сигнал RPM з кадром тривалістю 20 мс можна запакувати не більше восьми каналів (зазвичай шість-сім). Проблема обмеження мінімальної тривалості синхропаузи. Давайте порахуємо разом. Уявіть ситуацію, коли з восьми каналів треба передати імпульси максимальної тривалості $t_1...t_8 = 2000$ мкс. Тоді сумарна тривалість каналних імпульсів становитиме $8 \cdot 2000 = 16\,000$ мкс, а синхропаузи залишиться $20\,000 - 16\,000 = 4000$ мкс. Цього більш ніж достатньо для надійної роботи приймача. Але якщо додати дев'ятий канал, то синхропаузи залишиться $20\,000 - 9 \cdot 2000 = 2000$ мкс. З такою синхропаузою декодер стандартного приймача не зможе впізнавати початок кадру та розділяти канали. Якщо передавач формує каналні імпульси з максимальною тривалістю 2200 мкс, то в стандартний кадр не помістяться навіть вісім каналів.

Тому виробники апаратури йдуть на хитрощі та збільшують довжину кадру. Таким способом вдається помістити сигнал RPM до 14 каналів. Добре, що в більшості сучасних пультів можна налаштовувати довжину кадру, довжину строки та кількість каналів. Щоб приймач розпізнавав такий, не цілком стандартний сигнал, його доводиться прошивати відповідною прошивкою. Недоліком цього підходу є проблема сумісності приймачів та передавачів.

Істотним недоліком формату RPM є відсутність контролю за якістю даних, що приймаються. Якщо перешкода спотворила імпульси всередині кадру, то вони у спотвореному вигляді потраплять на вихід приймача. Деякі сучасні приймачі RPM, оснащені мікроконтролерами, можуть відфільтровувати заздалегідь помилкові імпульси у кожному каналі управління окремо. Алгоритм фільтрації частково нагадує алгоритм цифрового придушення перешкод у звуку чи зображенні. Приймач зберігає в пам'яті параметри імпульсів у кожному каналі і порівнює їх із знову надійшли. Вважається, що у нормальній ситуації тривалості імпульсів від кадру до кадру можуть змінитися лише певних розумних межах. Якщо приймач виявляє імпульси, що аномально змінилися, він вважає їх недостовірними і замінює їх тривалість значеннями з попереднього кадру. Таким чином, відбувається відпрацювання укороченої функції Failsafe по кожному каналу окремо. Принагідно приймач накопичує інформацію про кількість "зіпсованих" імпульсів, і коли вона перевищує критичний поріг в одиницю часу, приймач йде в глибокий Failsafe, як описано в попередньому розділі.

4. Формат сигналів PCM.

Імпульсно-кодова модуляція PCM (Pulse Code Modulation) застосовується підвищення помехостійкості каналу управління. Єдиного стандарту PCM немає, виробники використовують власні несумісні протоколи. У результаті апаратура PCM різних виробників взаємно несумісна, а змагання протоколів

насправді зводиться до боротьби за гарантії покупців, яких кожен виробник прив'язує до свого устаткування.

У протоколах PCM дані також передаються стандартними блоками чи пакетами. Пакет складається з цифрових значень для кожного каналу управління, службової інформації, контрольної суми та синхроблоку. Надмірність даних не передбачена. Якщо контрольна сума не сходиться, пакет відкидається, а на виходах приймача зберігається попередній стан (швидкий Failsafe). При накопиченні кількості помилок вище критичної межі або при повному зникненні пакетів включається глибокий Failsafe.

Кількість імпульсів у пакеті PCM значно більше, ніж у кадрі PPM. Але імпульси не можна надмірно вкорочувати, тому що при цьому збільшується ширина спектра радіосигналу, що випромінюється, жорстко обмежена нормами. Тому у випадку пакет даних PCM виходить довше, а швидкість за протоколом PCM нижче. Застосовуючи оптимізацію протоколу вдається скоротити тривалість пакета до 20 мс і менше. Наприклад, у кожному пакеті можна передавати інформацію лише про канали, що швидко змінюються, або чергувати канали, для яких передається інформація.

У масовій сучасній апаратурі застосовується широкосмуговий сигнал та імпульсно-кодова модуляція. Іншими словами, з переходом на апаратуру діапазону 2,4 ГГц рядовому споживачеві слід більше турбуватися про сумісність приймачів та передавачів різних виробників, а також про співвідношення ціни та якості апаратури, ніж про тонкощі кодування сигналу в радіотракті, оскільки на виході будь-якого приймача все одно будуть одні й самі сигнали, що подаються на польотний контролер чи виконавчі устроїства.

5. Сумісність апаратури стандартів DSM2/DSMX.

Про сумісність обладнання, що використовує протоколи модуляції ефірного сигналу DSM2 та DSMX, слід поговорити особливо, тому що ці протоколи надзвичайно популярні у виробників апаратури середнього та низького цінового сегмента. І, відповідно, мають широкий попит у авіамоделістів.

Протоколи DSM2 і DSMX - це фірмові протоколи, розроблені компанією Horizon Hobby, які використовуються не тільки у всіх її моделях, а й у пультах JR та Spectrum нижнього цінового діапазону, а також у приймачах OrangeRx, які коштують кілька доларів, але при цьому працюють без нарікань.

Передавачі та приймачі 08M2/T)8MX працюють у діапазоні 2,4 ГГц, розбитому на окремі канали. Специфікація сучасних протоколів визначає як формат цифрової імпульсної модуляції радіосигналу, а й алгоритм роботи з набором каналів. У протоколі ПБМ2 для зв'язку використовуються два канали, а в протоколі 08MX передавач перебирає їх за своїм унікальним алгоритмом. При цьому ймовірність натрапити на перешкоду статистично вище, але вплив цієї перешкоди триватиме менший час, що загалом підвищує стійкість до перешкод системи. Тому DSMX позиціонується як протокол для роботи у складних міських умовах.

Протокол DSMX більш новий. Апаратура стандарту DSMX, як правило, може працювати і протоколом DSM2, що забезпечує апаратну сумісність зверху вниз. Наприклад, якщо у вас є старий приймач стандарту DSM2, новий передавач стандарту DSMX можна переключити в режим DSM2. І навпаки, приймач стандарту 08MX може приймати сигнали від передавача П8М2. Іншими словами, якщо один із компонентів радіоканалу працює в старому стандарті DSM2, то вся система перемикається на цей стандарт. Особливо приємно, що ці два стандарти сумісні на рівні "заліза": якщо приймач або передавач DSM2 прошити новою прошивкою, він почне підтримувати протокол DSMX.

6. Сполучення приймача та передавача (біндинг).

Перш ніж розпочати експлуатацію радіоапаратури, необхідно провести спеціальну процедуру прив'язки приймача до передавача (біндинг, binding). Після прив'язки приймач запам'ятовує унікальний кодовий номер передавача, робочі канали або алгоритм перебору каналів та працює лише з цим передавачем.

Нюанси процедури біндинга залежать від обладнання, але в цілому процедура дуже проста. У спеціальний роз'єм приймача, позначений написом "BIND", вставляється перемичка і живлення подається на приймач. Приймач переходить у режим сполучення, показуючи це блиманням світлодіода. Потім включають пульт, тримаючи спеціальну кнопку на передавальному модулі, протягом декількох секунд відбувається обмін інформацією, і процедура завершується. Можна вимкнути живлення, видалити перемичку з приймача та приступати до польотів.

Більшість сучасних приймачів насправді є приймачами. Тільки передають вони слабкий сигнал з відривом у кілька метрів і лише обміну службовою інформацією з передавачем на момент прив'язки. У свою чергу, у модулі передавача є ще й приймач.

У процесі прив'язки приймач повідомляє передавачу, сигнали яких стандартів він може приймати, і передавач автоматично вибирає для роботи відповідний. Але не всі приймачі підтримують двосторонній обмін та автовибір стандарту. Будьте готові до того, що доведеться вручну за допомогою перемикача на радіомодулі або в меню налаштувань передавача вибрати стандарт передачі, що відповідає приймачеві.

Деякі приймачі, наприклад, у мініатюрних кімнатних моделях, мають функцію автобіндингу. При включенні вони завжди переходять у режим прив'язки і чекають на сигнал від передавача приблизно протягом 10-15 с. Якщо цей час вони приймають сигнал від " свого " передавача, то відразу переходять у штатний режим. Якщо ж під час очікування надходить сигнал прив'язки від нового передавача, приймач запам'ятовує унікальний код нового передавача і потім переходить у штатний режим.

Під час біндингу може відбуватися також налаштування функції Failsafe. Зазвичай приймач запам'ятовує для режиму Failsafe положення органів

управління на момент прив'язки. Завдяки цій опції можна забезпечити відносно м'яку посадку квадрокоптера або автоматичне повернення GPS до точки старту. Процедура налаштування різних приймачів може відрізнятись. Деякі приймачі взагалі не мають такої функції. Точні інструкції з налаштування Failsafe та прив'язки в цілому дивіться у документації виробника.

7. Імпульси PWM, тримери та субтримери.

Як ми вже говорили, незалежно від протоколу передачі інформації та способу декодування, у будь-якого приймача з роздільними виходами каналів на кожному з виходів присутні стандартні імпульси PWM, тривалість яких є параметром для виконавчих пристроїв.

Нагадаємо, що стандартні тривалості імпульсів PWM такі: мінімальна – 1000 мкс, середня – 1500 мкс, максимальна – 2000 мкс. Ці значення відповідають мінімальному, середньому та максимальному положенню рукоятки управління пульта. Але це ідеальні базові значення. Насправді вони можуть бути іншими. Наприклад розглянемо найпростішу ситуацію: у середньому положенні рукоятки пульта вал сервомашинки трохи відхилений від середнього становища. Можливо, це похибка сервомашинки, а може, похибка пульта, що в середньому не забезпечує 1500 мкс. Але сервомашинка не регулюється, тому в будь-якому випадку треба налаштовувати пульт. Для цього існують субтримери та тримери. Важливо розуміти різницю між ними.

Субтриммер симетрично зміщує у той чи інший бік весь робочий діапазон тривалостей. Наприклад, при зміщенні вгору на 100 мкс робочий діапазон становитиме 1100-2100 мкс із середньою точкою 1600 мкс. Таким чином, зберігається симетрія діапазону, але відбувається деякий вихід за його стандартні межі.

Триммер зміщує поточну робочу точку всередині діючого діапазону. Але при цьому вихід за межі діапазону за максимальних відхилень не відбувається. Наприклад, якщо ми тримером змістили робочу точку щодо фізичного положення рукоятки на 50 мкс вгору, то при середньому положенні рукоятки тривалість імпульсу становитиме 1550 мкс, але межі діапазону залишаться колишніми - 1000-2000 мкс.

Як бачите, триммер вносить асиметрію в канал управління: максимальний робочий хід вгору і вниз виходить різним. Тому для центрування каналів використовують субтримери, доступні в меню налаштувань передавача. Тримери застосовують у тих випадках, коли необхідно зробити оперативне коригування і цілеспрямовано привнести асиметрію в канал. Наприклад, модель літака має трохи несиметричне крило і завалюється вліво. У цьому випадку асиметрія за рахунок тримування каналу елеронів компенсує асиметрію крила. Такі налаштування зазвичай виконують у процесі польоту, тому важелі або кнопки тримерів винесені на передню панель пульта та діють без звернення до меню.

Квадрокоптер не має власних аеродинамічних якостей, симетрія його поведінки в польоті та управління по осях досягається автоматично, за рахунок

польотного контролера. Тому у випадку з квадрокоптерами особливо важливо дотримуватись симетрії параметрів керуючих імпульсів. Категорично не рекомендується при налаштуванні пультів під квадрокоптер використовувати тримери! Центральні значення сигналів керування, які повинні максимально точно відповідати 1500 мкс, досягаються лише за допомогою субтримерів.

8. Витрати та експоненти.

Часто буває так, що вихід за межі стандартного робочого діапазону недопустимим (наприклад, важіль сервомашинки впирається у щось) або бажано обмежити робочий хід виконавчих механізмів для м'якшого та безпечнішого управління. Робочий хід у той чи інший бік від центрального становища називається витратою і буває позитивним чи негативним залежно від напрямку відхилення.

Витрати апаратури вимірюються у відсотках від стандартного відхилення і налаштовуються через меню пульта. Можна встановити витрати як більші, так і менше 100%. Наприклад, якщо встановити витрати вгору і вниз по 90%, то мінімальна тривалість імпульсу становитиме $1500 - 500 \cdot 90\% = 1050$ мкс, а максимальна $1500 + 500 \cdot 90\% = 1950$ мкс. Зазвичай рекомендується "затискати" витрати апаратури для новачків, тому що їм властиво від хвилювання рухати стики пульта занадто сильно і різко.

Зазвичай позитивна і негативна витрата каналу можна регулювати окремо. Але, як ми вже казали, для квадрокоптерів принципово важлива симетрія робочого ходу, тому й витрати слід підлаштовувати лише симетрично. При налаштуванні квадрокоптера витратами підганяють мінімальне та максимальне значення тривалості імпульсу під необхідні для контролера. А гостроту реакції коптера на управління задають за допомогою спеціального коефіцієнта Rate у налаштуваннях польотного контролера.

Ще одним параметром, що істотно впливає на якість і комфорт пілотування є експонента - ступінь нелінійності відгуку системи на зміну керуючого сигналу. Строго кажучи, ця залежність отримала таку назву через візуальну схожість на графік експоненти $y = e^x$. Насправді механізм формування нелінійного відгуку дещо складніший. Щоб не завантажувати мікроконтролер пульта обчисленнями статечної функції в режимі реального часу, в пам'ять мікроконтролера записується готова таблиця значень певної статечної функції виду

$$\exp(x) = \frac{e^{kx} - 1}{e^k - 1},$$

де x – це значення відхилення рукоятки; do - коефіцієнт пропорційності. Під час роботи пульта значення цієї таблиці накладаються на лінійну залежність за формулою

$$Y = N \cdot \exp(X) + (1 - N) \cdot X,$$

де N - це відсоток експоненти в налаштуваннях пульта. Простіше кажучи, що більший відсоток експоненти Лг, то сильніше "викривляється" лінійна залежність відповідно до значень з таблиці (рис. 2). Наявність експоненти

дозволяє м'яко і комфортно керувати моделлю в районі невеликих відхилень рукояток, але в той же час, при необхідності, різко впливати на модель, паруючи порив вітру або виконуючи віраж. Глибину експоненти кожен пілот налаштовує під себе і кожної моделі окремо. У загальному випадку рекомендується збільшувати експоненту для пілотів-початківців, схильних до нервових і суєтних посмикувань рукояток пульта, і зменшувати аж до повної лінійності відгуку для повітряної акробатики.

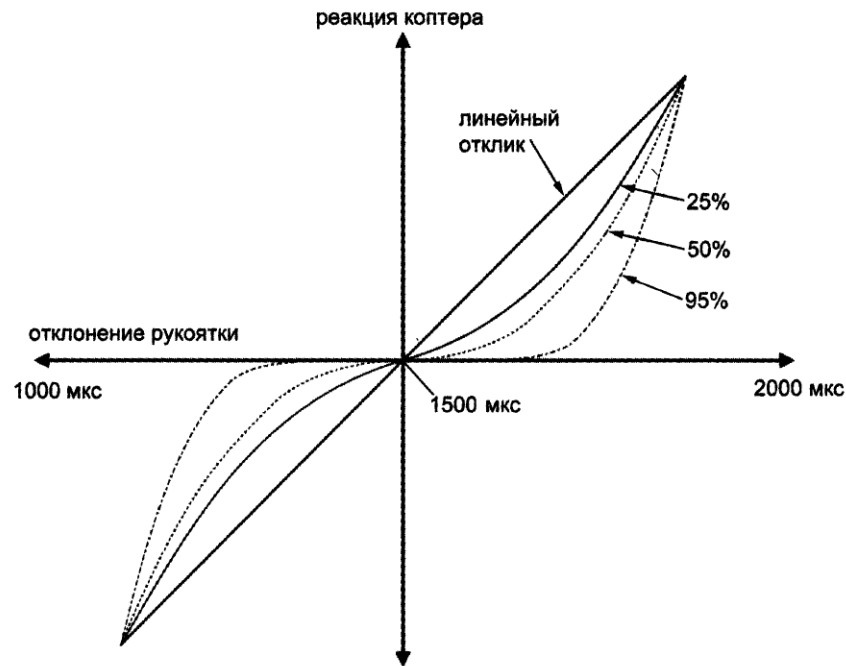


Рисунок 2. Експонента сигналу керування

Глибина експоненти задається в налаштуваннях контролера, а в налаштуваннях пульта експоненти бути не повинно. Експоненти пульта та контролера не повинні накладатися на сигнал одночасно.

Загальна концепція радіокерування коптером така: пульт повинен передати максимально точні та стандартні "сирі" сигнали управління, а всю подальшу обробку виконуватиме політний контролер на основі своїх налаштувань.

9. Конвертер PPM-EiM.

У багатоканальної системи з роздачею широтно-модульованих імпульсів по окремих вихідних каналах є принципово непереборні недоліки. По-перше, окремий сигнальний провід для кожного каналу. Це особливо актуально для 12- або 14-канальних систем. У цьому випадку мініатюрний приймач з'єднується з польотним контролером та іншими бортовими пристроями товстим джгутом проводів, неестетичним і більшим, ніж сам приймач. Однак польотний контролер може і сам декодувати "сирий" PPM-сигнал, за умови, що його виведено на окремий вихід приймача.

По-друге, низька стабільність і точність сигналу, що управляє, обумовлена необхідністю зайвих перетворень з одного типу сигналу в інший. Було б логічно передати цифрове значення, що відповідає положенню рукоятки

пульта, радіоканалу і потім з приймача переслати у виконавчий пристрій без зайвих перетворень. Однак для обробки цифрового сигналу виконавчий пристрій повинен мати власні обчислювальні ресурси. Але можливість випускати такі пристрої масово та недорого виникла лише відносно недавно, з появою дешевих та мініатюрних мікроконтролерів. Тому в традиційній системі приймач у будь-якому випадку перетворює цифровий сигнал імпульси певної тривалості на виході каналу. Незважаючи на те, що імпульс представлений двійковими рівнями сигналу "0" та "1", фізична тривалість імпульсу - це аналоговий параметр. Тобто, на етапі передачі-прийому ми маємо перетворення з аналогового сигналу на цифровий і назад на аналоговий.

Якщо вихід приймача підключений до звичайної сервомашинки (принцип її роботи ми розглянемо далі), вона використовує безпосередньо тривалість імпульсу як управляючого параметра. Якщо ми подаємо широтно-модульований імпульсний сигнал на вхід польотного контролера, він повинен виміряти тривалість імпульсу з допомогою таймера і перевести їх у цифрове значення. У результаті ми отримуємо в тракті управління ланцюжок перетворень, кожне з яких вносить свою похибку та затримку.

Отже, очевидні недоліки традиційної системи радіоуправління - обмежена пропускна здатність, спотворення та затримки сигналів управління, товстий пучок дротів від приймача до виконавчих пристроїв. Щоб позбутися пучка проводів, використовують спеціальний пристрій — кодер-конвертер PPM. З погляду інженерної логіки це досить кумедний пристрій. Воно підключається до виходів каналів приймача і перетворює окремі командні імпульси у послідовність пакетів імпульсів. З виходу конвертера сигнал PPM надходить спеціальний вхід польотного контролера. Такий вхід зазвичай позначають PPM-SUM, тому що на нього подається сумарний сигнал PPM. Приймач щойно успішно "розклав" сигнал каналами, а конвертер знову збирає в послідовність, вносячи додаткову похибку і затримку. Мабуть, основна користь такого пристрою — позбавлення від пучка проводів. Цілком логічно, що з'явилися приймачі, оснащені виходом сигналу послідовного. Це може бути як і той самий універсальний сигнал PPM-SUM, і особливий пропріетарний послідовний сигнал S-BUS фірми Futaba, схожий протокол UART. Різні виробники можуть кодувати вихідний сигнал по-різному. Послідовний протокол дозволяє підключати всі керовані виконавчі пристрої однієї спільної шині. Кожен пристрій, отримавши синхроімпульс, зчитує з шини "свій" пакет цифрових даних та декодує його.

Оскільки пакети даних у послідовному каналі йдуть у певному порядку, цифрове виконавче пристрій (сервомашинка, регулятор обертів, радіоключ) має бути попередньо запрограмоване на певний номер каналу, тобто на вилучення "свого" блоку даних із послідовного потоку. Для цього застосовуються спеціальні програматори. Якщо послідовний сигнал подається на спеціальний вхід польотного контролера, подальшу обробку виконує контролер, а порядок проходження каналів налаштовується в прошивці контролера або в приймачі. У

будь-якому випадку порядок проходження каналів у передавачі та контролері повинен збігатися.

10. Приймач-сателіт.

Надійність роботи радіоканалу можна підвищити за допомогою спеціального приймача-сателіту. Він є звичайним приймачем, у якого відсутній вузол обробки прийнятого сигналу. Натомість на вихід сателіту йде послідовний "сирий" потік. Цей потік надходить на спеціальний вхід основного приймача. Деякі приймачі допускають підключення двох сателітів. Приймачі монтують так, щоб антени базового приймача та сателіту знаходилися на максимальній відстані один від одного. Антени можуть мати різну конструкцію та орієнтацію у просторі. Якщо одна із приймальних частин втрачає сигнал, її підстраховує друга частина.

Оскільки польотний контролер може самостійно обробляти послідовний керуючий сигнал, можна підключити маленький та легкий сателіт безпосередньо до контролера та обійтися без основного приймача, зменшивши вагу та енергоспоживання. Таке рішення популярне при розробці мініатюрних конструкцій, які зазвичай не відлітають із зони сталого зв'язку.

11. Вбудована телеметрія.

Оскільки майже всі сучасні пульти управління, навіть недорогі, оснащені матричним графічним дисплеєм, цілком логічно використовувати цей дисплей для відображення телеметрії даних. Для цього можна замінити прошивку пульта версією, що підтримує виведення телеметрії, та внести зміни в конструкцію пульта, підключивши до нього зовнішній приймач. Але простіше придбати готовий комплект модулів, наприклад РГБК. Модуль, що підключається до пульта, містить не тільки передавач радіоуправління, а й приймач телеметрії. Існують також дорогі та складні комплекти апаратури радіокерування із вбудованою функцією телеметрії та навіть із окремим спеціальним дисплеєм на пультах.

12. Антени.

Конструкції та типи антен, що застосовуються в радіокеруванні, залежать від призначення пристрою. Щоб розуміти цю залежність, необхідно мати хоча б загальне уявлення про основні параметри антени. Ці параметри тісно взаємопов'язані і розглядати їх слід у комплексі. Діаграма спрямованості - це графічно виражена залежність коефіцієнта посилення антени залежно від напрямку у заданій площині. Спрощено кажучи, це залежність ефективності роботи антени від напрямку у просторі. Прикладом всеспрямованої антени є вертикальний штир. Його діаграма спрямованості у горизонтальній площині представляє собою коло, т. е. напрям випромінювання чи прийому немає значення. У спрямованій антені сплески коефіцієнта посилення діаграмі називають пелюстками.

На рис. 3 показаний приклад діаграми для вузькоспрямованої антени. На діаграмі видно три характерні області - 1, 2 і 3. Область 1, якій відповідає найбільший рівень прийнятого сигналу, називають основною, або головною пелюсткою діаграми спрямованості. Області 2 і 3, що знаходяться з боку рефлектора антени, називаються задніми та бічними пелюстками. Наявність цих пелюсток свідчить про те, що антена приймає радіохвилі не тільки спереду (в робочому напрямку), але й ззаду (з боку рефлектора), що знижує стійкість до перешкод. Аналогічно при передачі наявність побічних пелюсток знижує ефективність випромінювання в робочому напрямку. У зв'язку з цим при розробці та налаштуванні антени прагнуть зменшити число та рівень задніх та бічних пелюсток.

Оскільки в радіоуправлінні ми маємо справу з об'єктом, що вільно переміщується у просторі, необхідно брати до уваги об'ємну діаграму спрямованості. Наприклад, для штирєвої антени це "бублик" з максимумом у напрямках, перпендикулярних штирю. У поздовжньому напрямку штирева антена не випромінює і приймає сигнал.

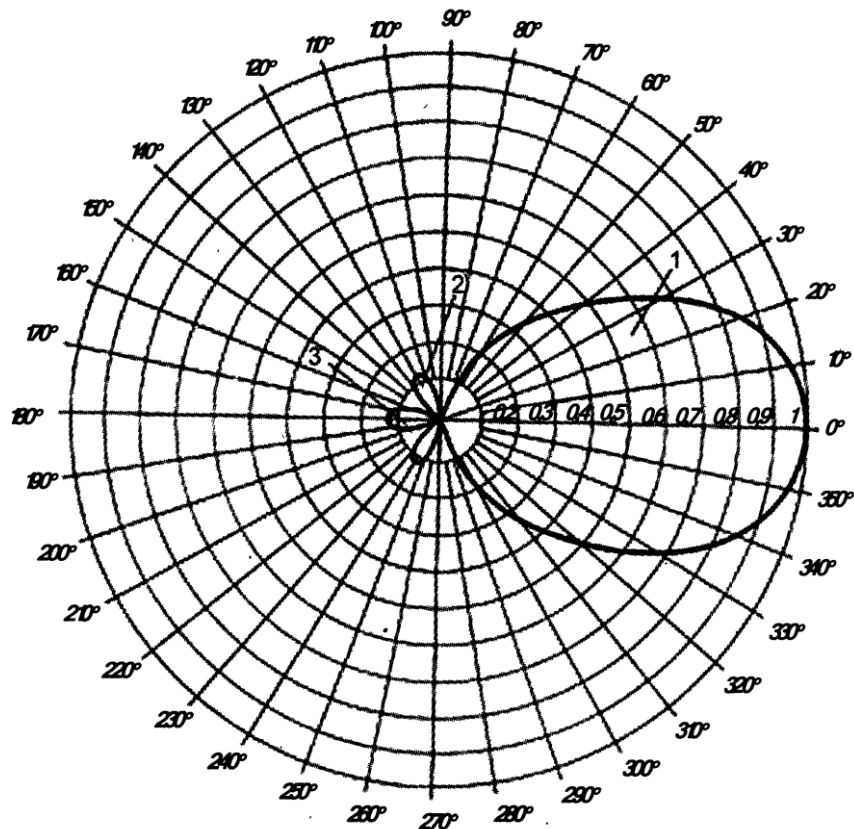


Рисунок 3. Приклад діаграми направленості антени

Коефіцієнт посилення показує, скільки разів потрібно змінити сигнал на вході антени щодо сигналу на вході ідеальної всеспрямованої антени, щоб у точці прийому напруженість електромагнітного поля не змінилася. Коефіцієнт посилення, виражений децибелах (дБ, dBI), може бути як позитивним, і негативним. Негативне значення притаманне антенам з низьким ККД (коефіцієнтом корисної дії): укороченим, малогабаритним, широкосмуговим.

Низький ККД не означає низьку спрямованість антени. Наприклад, антена з вузькою діаграмою спрямованості може мати низький ККД і погано випромінювати або приймати сигнал внаслідок згасань сигналу в елементах конструкції.

Робоча частота (смуга частот) — це частотний діапазон, у якому антена реалізує щонайменше 90% від максимального ККД. Робоча частота жорстко пов'язана з геометричними розмірами та конструкцією антени. Чим більша довжина хвилі, тим більша антена. Тому збільшення робочої частоти до 2,4 ГГц суттєво знизило габарити та вагу антен.

Поляризація — це спрямованість вектора електричної складової електромагнітної хвилі у просторі. Розрізняють вертикальну, горизонтальну та кругову поляризацію. Цей параметр важливий для врахування взаємної орієнтації антен у просторі. Наприклад, якщо штирова антена передавача розташована вертикально, то й штирева антена приймача повинна бути розташована вертикально, інакше рівень сигналу може істотно знизитися. Крім того, радіосигнал може змінити поляризацію при проходженні через неоднорідність повітряних мас ("повітряні лінзи"). Тому приймачі авіамоделей часто постачають додатковими антенами з різною орієнтацією у просторі.

Робоча потужність — параметр, важливий для антени. Перевищення потужності, що підводиться до антени, може призвести до виходу з ладу не тільки антени, а й передавача. Причому друге навіть ймовірніше.

Принцип оборотності антен свідчить, що властивості антени (діаграма спрямованості, коефіцієнт посилення, робоча частота) не залежать від того, чи працює антена на передачу або на прийом.

Існують й інші параметри антен, але для модельєра-початківця вони не мають принципового значення. Щодо самостійної розробки антен, то це дуже складний процес, що вимагає глибоких професійних знань, а також наявності спеціального вимірювального обладнання для тестування та налаштування. Якщо ви цим набором не маєте, то краще не марнувати час і купувати готові антени, або виготовляти нескладні і багаторазово перевірені конструкції.

Розглянемо основні типи антен, що застосовуються в апаратурі радіокерування діапазону 2,4 ГГц та каналах відео- та телеметрії.

Ненаправлені антени. Найбільш поширеними неспрямованими антенами є штирева та колінеарна. У стандартній поставці передавач радіоуправління комплектується найпростішою штирьовою антеною, схожою на ті, які використовуються в недорогих Vi-Fi-роутерах. Антенами такої ж конструкції, але на діапазон 5,8 ГГц можуть бути оснащені передавачі та приймачі відеоканалу.

Антена цієї конструкції є напівхвильовим вібратором, запитаним у середині (рис. 4). Одна частина вібратора складається з чвертьхвильової трубочки, якою проходить кабель. Обплетення кабелю припаяна до кінця цієї трубочки. Другою частиною вібратора є чвертьхвильова центральна жила кабелю, вільна від обплетення екрану.

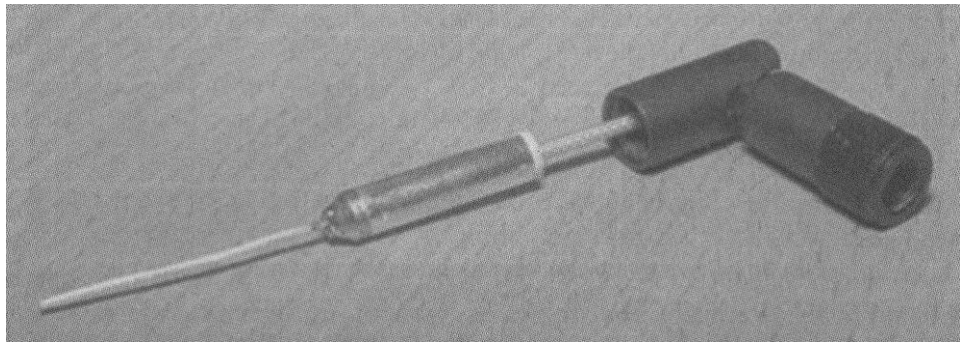


Рисунок 4. Штиркова антена передавача

Іноді в устаткуванні застосовуються так звані колінеарні антени, що складаються з декількох випромінюючих елементів, послідовно з'єднаних через фазообертачі. І тут антена займає всю довжину кожуха (рис. 5). Тому треба бути акуратним при заміні зламаної антени і попередньо перевірити внутрішній пристрій антени, що замінюється, щоб забезпечити повноцінну заміну.

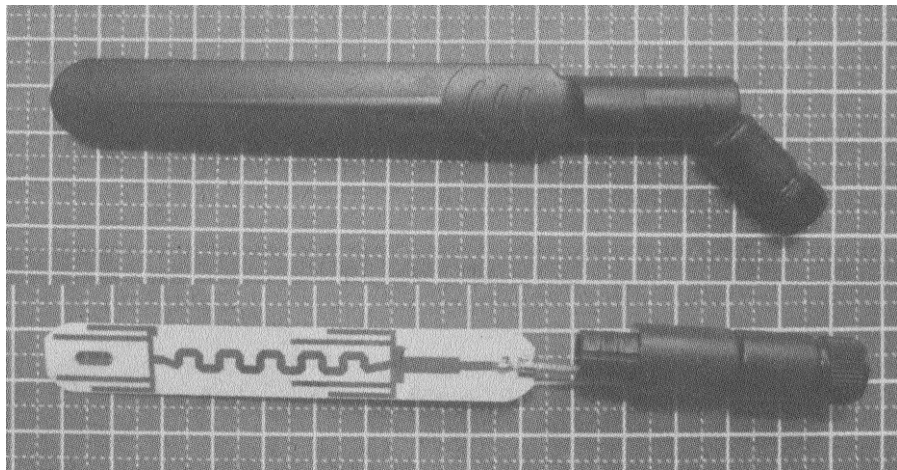


Рисунок 5. Дводіапазонна ненаправлена колінеарна антена

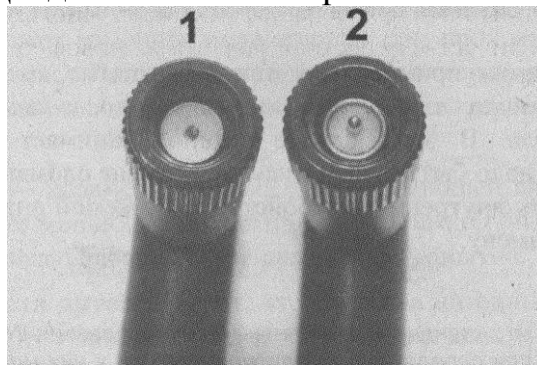


Рисунок 6. Рознімання типу SMA антени з гніздовою (1) та штирковою частиною (2)

Щоб визначити робочий діапазон без застосування спеціального обладнання, можна акуратно розібрати антену та виміряти довжину чвертьхвильового вібратора: для діапазону 2,4 ГГц- $1/4\lambda = 31$ мм; для діапазону 5,8 ГГц- $1/4\lambda = 13$ мм.

У бортових приймачах радіоуправління для економії ваги зазвичай використовуються штирьові антени у вигляді шматочка дроту довжиною 31 мм ($1/4$ довжини хвилі 2,4 ГГц) або у вигляді центральної жили екранованого дроту, очищеної від екрану на цю довжину.

Малогабаритні антени на діапазон 433 МГц зазвичай є спіраль, підключену до центральної жили кабелю, і не містять вбудованої противаги (рис. 8).

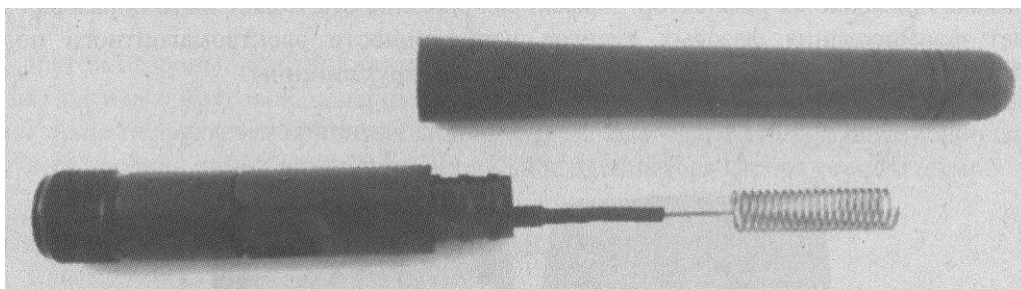


Рисунок 8. Внутрішній пристрій антени на частоту 433 МГц

При побудові відеоканалу часто застосовують антени типу "конюшина" (рис. 9). Вони поєднують у собі кругову поляризацію випромінювання та майже кулясту об'ємну діаграму спрямованості. Це означає, що взаємне положення передавальної та приймальної антени майже не впливатиме на якість сигналу. Кількість пелюсток антени визначає рівномірність діаграми спрямованості. Чим більше пелюсток, тим більше діаграма схожа на рівну кулю. Проте чотирипелюсткова антена важча, тому її ставлять на наземне обладнання. Практичний досвід безлічі моделейстів також говорить про те, що застосування чотирипелюсткової антени на землі ефективніше. Іноді трапляється помилкова думка, що від кількості пелюсток залежить хвильовий опір антени, але це не так.

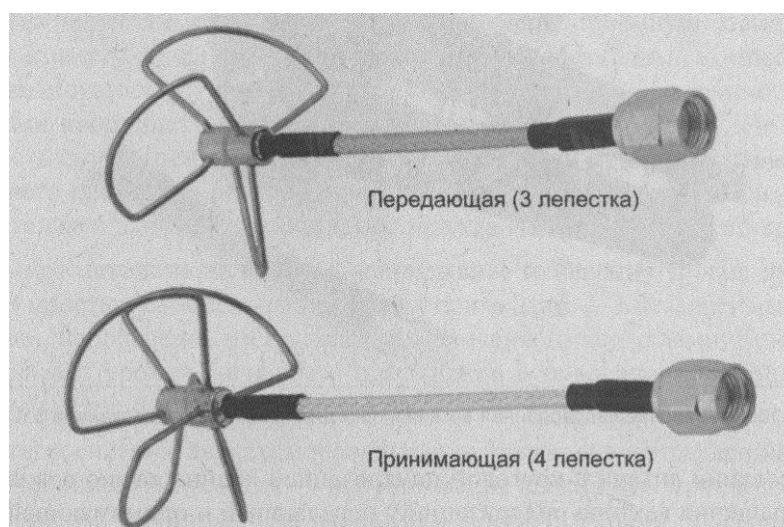


Рисунок 9. Антени типу «клевер»

Спрямовані антени. Варіантів конструкції антен спрямованої дії набагато більше (рис. 10 та 11), ніж ненаправленої. Причому не завжди для створення

спрямованої діаграми застосовується рефлектор. Ефект спрямованості може бути утворений за рахунок формування фазових зрушень напруженості електромагнітного поля в елементах конструкції та/або в просторі навколо антени.

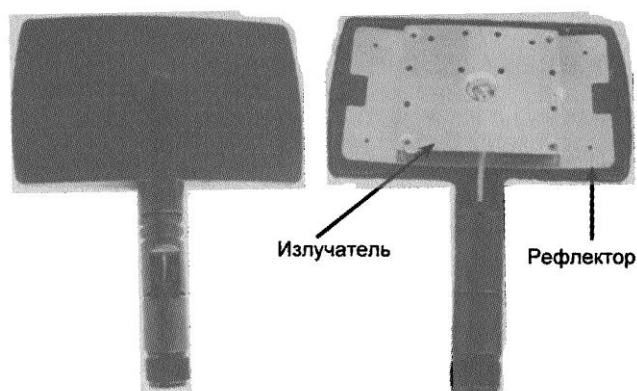


Рисунок 10. Направлена портативна антена діапазона 2,4 ГГц

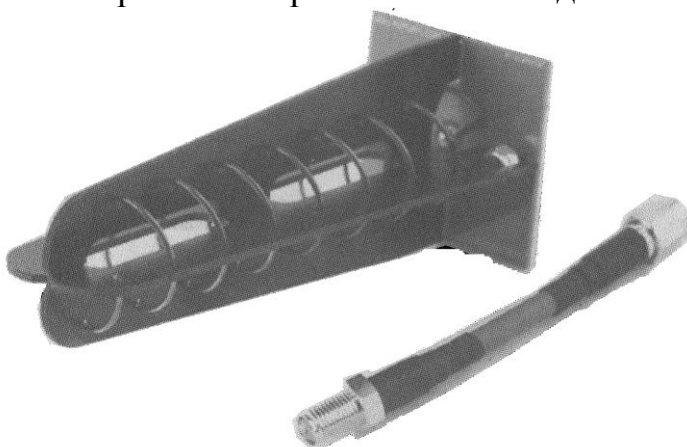


Рисунок 11. Спиральна направлена антена Helix для приймача відеосигналу 5,8 ГГц

При використанні антен з круговою поляризацією вкрай важливий збіг напрямку обертання вектора поляризації у антени, що передає і приймає. Наприклад, у спіральних антен має збігатися напрямок навівки спіралі. В іншому випадку відбудеться різке зниження рівня сигналу, що приймається навіть при ідеальній взаємній орієнтації антен. Особливо легко помилитися з вектором поляризації під час використання антен різного типу. Поширеною помилкою є використання у відеоканалі передавальної бортової антени типу "конюшина" і приймаючої спіральної без урахування напрямку вектора поляризації.

З іншого боку, при відображенні від перешкод (земна поверхня, стіни будівель) сигнал з круговою поляризацією стає лінійно поляризованим і ефективно пригнічується антеною, що приймає. Завдяки цьому істотно знижується урорець перешкод на зображенні у вигляді зображення, що двояться, і шумів.

13. Системи стеження за напрямком.

Використання спрямованої антени істотно підвищує дальність радіоканалу, але виникає проблема утримання напрямку на об'єкт, що рухається. Якщо спрямовану антену змонтовано на пульті або відеоокулярах, то проблема вирішується за рахунок переміщення оператора. В інших випадках потрібна допомога помічника або спеціальна автоматична система стеження за напрямком (трекер). Трекери використовуються в наземних антенах прийому відеосигналу та телеметрії. Треба мати на увазі, що через неоднорідність навколишнього простору може відбуватися відображення та інтерференція сигналу, і оптимальна орієнтація антени може трохи відрізнятись від фактичного спрямування на об'єкт.

Для трекінгу застосовуються два основні методи: координатний та сигнальний. У першому методі координати моделі, визначені GPS, каналом телеметрії або каналом звуку надходять на наземний трекер. Контролер трекера виходячи з власних координат і координат об'єкта обчислює напрям. Перевагою методу є простота радіоприймаючої частини, у якій використовується лише один приймач, стійкість до захоплення хибних джерел сигналу. Недоліки: необхідність точно позиціонувати приймальну станцію за координатами та азимут, а для цього вона повинна мати власний компас та приймач GPS або можливість ручного введення координат. Складання похибок GPS для визначення координат двох точок знижує точність наведення. Не враховується можливість випадкових просторових спотворень під час поширення сигналу, через що наведення координатами завжди оптимально. При втраті зв'язку губляться також дані про координати об'єкта, що посилює ситуацію.

У сигнальному методі використовується безперервне вимірювання рівня сигналу, що приймається. У простих саморобних трекерах застосовують 2-3 незалежних приймача з антенами, спрямованими під кутами, що злегка розрізняються. Контролер трекера порівнює рівні сигналів із приймачів та повертає турель у бік антени з найкращим сигналом. Перевагою системи є правильна орієнтація у бік найкращого прийому. Очевидний недолік - використання кількох приймачів та антен. У більш простому варіанті, що сканує, використовується один приймач і антена. Контролер безперервно вимірює рівень сигналу з виходу Я851 приймача і при його зниженні відхиляє антену на кілька градусів у різних напрямках, скануючи зону стеження та "відловлюючи" новий оптимальний напрямок. Оскільки стеження відбувається безперервно, після кількох циклів коригування/відстеження контролер починає більш-менш точно прогнозувати напрямок руху об'єкта.

У дорогих професійних системах може застосовуватися антена із синтезованою апертурою та вимірювання зсуву фаз несучої частоти для уточнення напрямку на об'єкт.

Очевидним недоліком трекерів, що використовують стеження за рівнем сигналу, є хибне захоплення стороннього джерела потужнішого сигналу, випадково працює на цій же частоті. Але, на щастя, у відкритому полі

ймовірність такої події невисока. Найпростішою та недорогою альтернативою автоматичному трекеру є ручне керування антеною. Деякі комплекти апаратури радіокерування дозволяють прив'язати до передавача кілька приймачів. В цьому випадку недорогий приймач ставлять на трекер, підключають до нього сервомашину трекера і керують поворотом антени, обертаючи потенціометр на пульті.

14. Диверсифікація антен.

Літаючі моделі інтенсивно змінюють своє становище у просторі. Тому важливо забезпечити стійкий радіоканал за будь-якого взаємного становища антен. У приймачах радіокерування іноді використовують дві антени, розташовані під кутом 90° , або додаткові приймачі-сателіти, у яких теж мають антени в різних місцях моделі і під різними кутами. Цей прийом називається просторовою диверсифікацією антен.

Іноді виникає потреба у диверсифікації на кшталт антени (рис. 2.20). Наприклад, антени для прийому відеосигналу можуть мати дуже гостру діаграму спрямованості. Така властивість суттєво підвищує ефективну дальність прийому та завадостійкість, але варто відхилити антену на кілька градусів у бік від напрямку на модель, і сигнал може різко та раптово зникнути. Тому в поєднанні з гостронаправленою антеною іноді застосовують другу антену, що має ширшу або взагалі кругову діаграму спрямованості. При втраті сигналу з основної антени якість сигналу з дублюючою може бути помітно гіршою, але в більшості випадків оператору буде достатньо, щоб не втратити управління. Диверсифікація по частотному діапазону (дублювання каналу) в аматорській практиці застосовується рідко, тому що вимагає наявності подвійного комплекту обладнання для приймання на різні діапазони.