

ДЕНИС БАХТІЯРОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИПЛЕКСОВАНОГО СИГНАЛУ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Поставлено та обґрунтовано завдання на створення вітчизняного комплексу повітряної розвідки. Розглянуто основні принципи формування радіосигналу керування безпілотними літальними апаратами в каналах передачі даних «земля-борт». Встановлено переваги використання періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів з широтно-імпульсною модуляцією для переносу корисного інформаційного сигналу керування безпілотними літальними апаратами. Проаналізовано основні характеристики типового наземного та бортового обладнання керування безпілотними літальними апаратами. За результатами аналізу проведено експериментальне дослідження мультиплексованого сигналу керування з широтно-імпульсною модуляцією від наземного обладнання FlySky ST-6B. У результаті дослідження продемонстровано відповідність форми каналного сигналу керування положенню джойстику пульта дистанційного керування та запропоновано структурну схему захищеної системи передавання сигналів керування безпілотним літальним апаратом з використанням сертифікованого в Україні блочного алгоритму шифрування ГОСТ 28147-89.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, радіосигнал керування, каналний імпульс, дистанційне керування, багатоканальна передача інформації, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ. Стимулом до розвитку безпілотної авіації у всьому світі послужила потреба в легких, відносно дешевих літальних апаратах, які володіють високими характеристиками маневреності, і здатних виконувати широке коло завдань.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) успішно застосовуються в ході військових операцій по всьому світу, і при цьому вони так само успішно виконують завдання цивільного призначення.

На сьогоднішній день більшість існуючих безпілотних літальних апаратів пілотуються вручну, за допомогою пультів дистанційного керування, що використовують радіоканал зв'язку. При ручному керуванні БПЛА виникають труднощі, пов'язані з підготовкою пілотів, недостатньою робочою дальністю, обмеженнями, пов'язаними з погодними умовами.

Наведена в річному звіті UVS International статистика показує, що неухильне зростання кількості БПЛА в світі супроводжується зростанням числа розробників. При цьому кількість країн, залучених в цей процес, практично не змінюється. У тому ж звіті наводиться розподіл кількості розроблених систем БПЛА по країнах. У переліку згадано 59 країн. На озброєнні армій 41 держави знаходиться близько 80 типів апаратів, призначених в основному для вирішення розвідувальних завдань. Характерною особливістю існуючих парків БПЛА є переважання апаратів малої і середньої дальності: на їх частку припадає 98% всього складу. У світі всього 6 країн мають повну технологією виробництва комплексів БПЛА [1].

Дослідженню каналу керування безпілотними літальними апаратами присвячено багато праць іноземних та вітчизняних авторів (А. В. Полинкін, Р. К. Кадем, О. О. Толпегін, А. О. Сизова, Т. Ю. Емельянова, Х. Т. Ле) [2, 3, 4], було проведено компонентний аналіз БПЛА, проаналізовано втрати при розповсюдженні сигналу та характеристики радіоканалу. Разом з тим автори не ставили мету й завдання дослідження форми сигналу керування в каналі обміну інформацією «борт-земля», які й визначають наукову новизну останнього.

Постановка завдання. Великий попит на використання безпілотної авіації у військовій та цивільній галузях зумовлює використання різного типу бортового обладнання від різних виробників для керування БПЛА. Водночас неспокійна ситуація на сході України вимагає від

армії використання БПЛА для розвідки на ворожих територіях. Дана ситуація спонукає до постановки завдання на створення вітчизняного безпілотного комплексу повітряної розвідки з використанням захищеного каналу керування.

Грунтуючись на цих фактах необхідно проаналізувати сигнал керування безпілотними літальними апаратами від наземного обладнання та розробити захищену систему передавання сигналів керування БПЛА.

Основний принцип формування радіосигналу керування. Для того, щоб випромінюваний передавачем радіосигнал міг переносити корисну інформацію, він піддається модуляції. На практиці керування БПЛА знайшла застосування широтно-імпульсна модуляція. При широтно-імпульсній модуляції (ШІМ; англійський термін – «pulse width modulation», PWM) як несуче коливання використовується періодична послідовність прямокутних імпульсів, а інформаційним параметром, пов'язаним з дискретним модулюючим сигналом, є тривалість цих імпульсів.

Періодична послідовність прямокутних імпульсів однакової тривалості має постійну складову, обернено пропорційну шпаруватості імпульсів, тобто прямо пропорційну їх тривалості [4]. Пропустивши імпульси через фільтр низьких частот (ФНЧ) з частотою зрізу, значно меншою, ніж частота проходження імпульсів, цю постійну складову можна легко виділити, отримавши постійну напругу. Якщо тривалість імпульсів буде різною, ФНЧ виділить повільно мінливу напругу, що дозволить відстежувати закон зміни тривалості імпульсів.

У процесі керування безпілотними літальними апаратами використовується тільки багатоканальна передача інформації. Для цього всі канали ущільнюються в один за допомогою мультиплексування.

Розглянемо типовий PWM сигнал 4-х каналної апаратури (див. рис. 1).

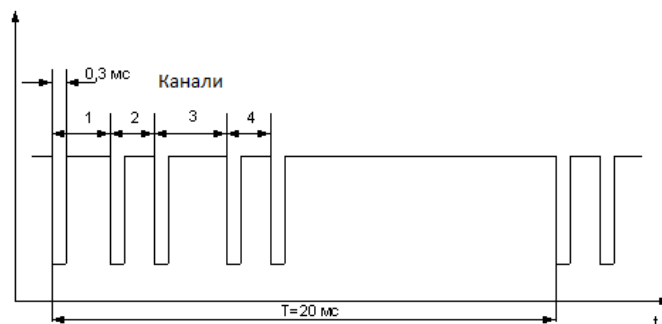


Рисунок 1 – Приклад мультиплексованого PWM сигналу 4-х каналної апаратури

Сигнал керування має фіксовану довжину періоду $T = 20$ мс. Це означає, що інформація про положення ручок апаратури керування на передавачі оброблюється приймачем 50 разів на секунду, що визначає швидкодію апаратури керування. Як правило, цього вистачає, оскільки швидкість реакції пілота на поведінку БПЛА набагато менше. Всі канали пронумеровані і передаються за порядком номерів (див. рис. 1). Значення сигналу в каналі визначається величиною тимчасового проміжку між першим і другим імпульсом – для першого каналу, між другим і третім – для другого каналу і т.д. Діапазон зміни величини часового проміжку при русі джойстика з одного крайнього положення в інше визначений від 1 до 2 мс. Значення 1,5 мс відповідає середньому (нейтральному) положенню джойстика. Тривалість міжканального імпульсу становить близько 0,3 мс. Дана структура PWM сигналу є стандартною для всіх виробників апаратури радіокерування. Значення середнього положення ручки у різних виробників може трохи відрізнитися: 1,52 мс – у Futaba; 1,5 мс – у Hitec і JR; 1,6 – у Multiplex; в нашому випадку становить 1,4 мс за попередніми розрахунками.

Діапазон зміни у деяких видів комп'ютерних передавачів може бути ширше і досягати від 0,8 мс до 2,2 мс.

Характеристика досліджуваного бортового та наземного обладнання керування БПЛА. Для створення експериментальної моделі керування БПЛА було обрано пульт дистанційного керування «FlySky CT-6B» (див. рис. 2-3).

Комплект 6-канальної радіоапаратури «FlySky FS-CT6B» з 6-канальним приймачем «FS-R6B» для радіокерованих моделей літаків, вертольотів і планерів.

Апаратура «FS-CT6B» програмується при підключенні до комп'ютера за допомогою спеціального кабелю і програмного забезпечення.

Передача даних здійснюється за запатентованою FlySky системою AFHDS (Automatic Frequency Hopping Digital System), завдяки якій досягається повна завадозахищеність, швидка реакція і великий радіус дії.

Комплект підходить як для початківців, так і для професійних пілотів. Компанія FlySky одна з найбільших світових виробників апаратури керування для радіокерованих моделей. На підставі багаторічного досвіду використання їх пульти зарекомендували себе як одні з найбільш надійних і недорогих систем радіокерування.



Рисунок 2 – Наземне обладнання керування БПЛА FlySky CT-6B

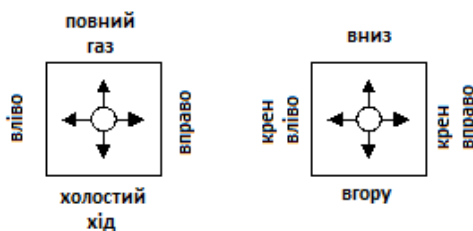


Рисунок 3 – Схематичне зображення розкладки функцій по джойстикам

Характеристики «FlySky CT-6B»:

- підтримка моделей: гелікоптери, літаки, планери;
- програмується підключенням до комп'ютера;
- звукова сигналізація;
- можливість налаштування реверсів по всіх каналах;
- регулювання кінцевих точок по всіх каналах (кут відхилення сервопроводів);
- можливість перепризначення каналів;
- sub-триммери по всіх каналах;
- попередження про низьку напругу;
- технологія: 2.4ГГц AFHDS;
- порт симулятора: роз'єм PS/2 з PWM модуляцією;
- кількість каналів: 6;
- живлення: 12В (8 батарей AA 1.5В);
- розміри: 189x97x295мм;
- вага: 511г.

Характеристики приймача «FS-R6B» (див. рис. 4):

- розміри: 45x23x9мм;
- вага: 13г;

- живлення: 4.0 – 8.4В;
- кількість каналів: 6 [5].

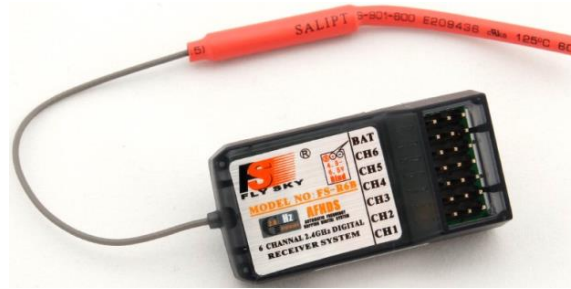


Рисунок 4 – Бортове обладнання керування БПЛА FS-R6B

Дослідження вихідного PWM сигналу наземного обладнання FlySky при різних положеннях ручок контролера. Для експериментального встановлення форми сигналу в лабораторних умовах було використано осцилограф та фотокамеру для наглядного фіксування осцилограми. Зняття мультиплексованого сигналу проводилось зі спеціалізованого інтерфейсу формфактору PS/2 на задній панелі наземної апаратури керування.



Рисунок 5 – Досліджуване обладнання керування БПЛА з пронумерованими каналами

Результати експериментального дослідження продемонстровано на рис. 6-12. Мультиплексований сигнал з широтно-імпульсною модуляцією на виході наземної апаратури керування БПЛА передається 50 разів на секунду з періодом $T = 20$ мс.

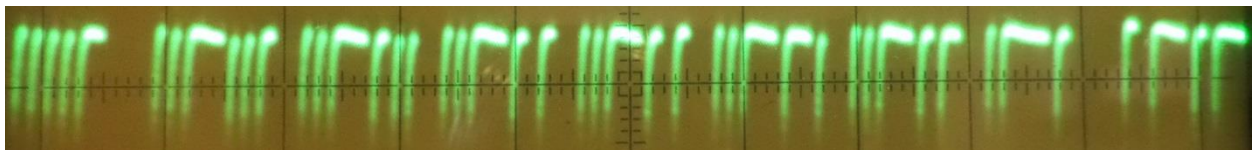


Рисунок 6 – Нейтральне положення

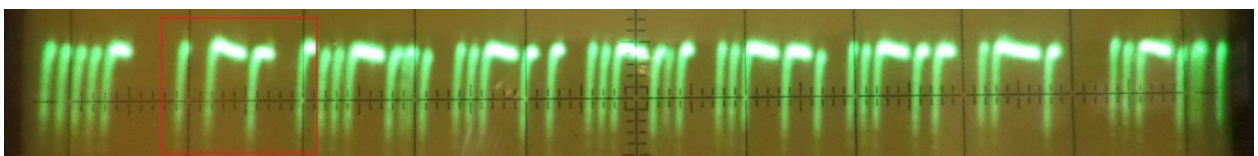


Рисунок 7 – Канал 1; положення →

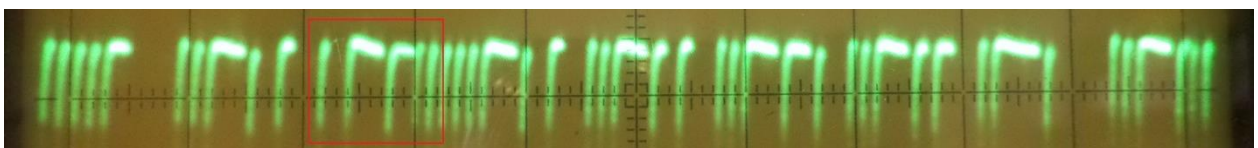


Рисунок 8 – Канал 2; положення ↑

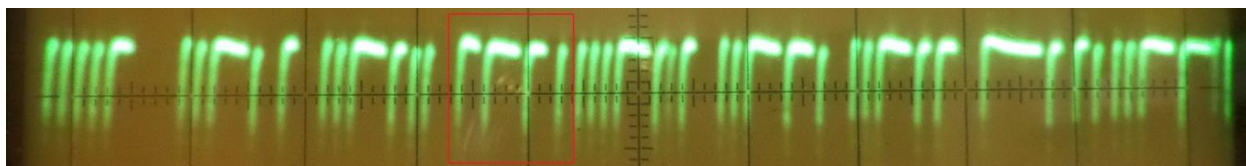


Рисунок 9 – Канал 3; положення ↓

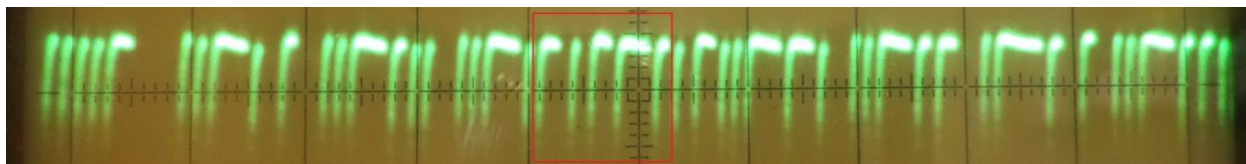


Рисунок 10 – Канал 4; положення ←

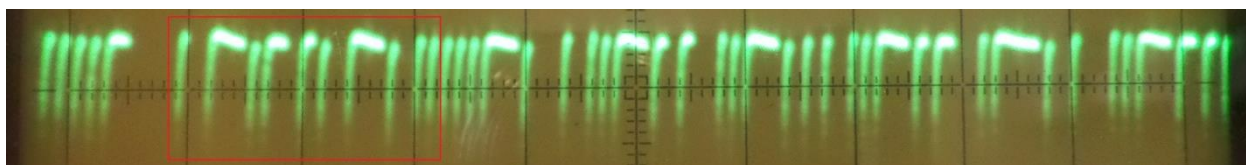


Рисунок 11 – Канал 1-2; положення ↗

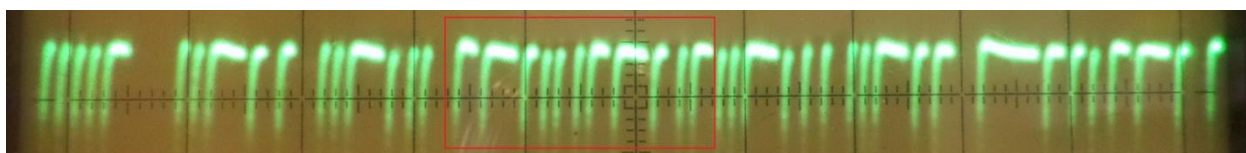


Рисунок 12 – Канал 2-3; положення ↙

Під час обміну керуючою інформацією у напрямку «земля-борт» канали пронумеровані і каналні сигнали передаються за порядком номерів, зміна сигналу виділена квадратом. Положення серводвигунів на приймальній стороні залежить від ширини прийнятого демультіплексованого по відповідним каналам імпульсу зображено на рис. 13.

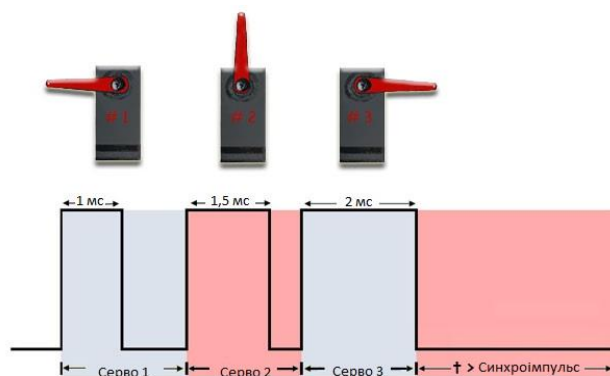


Рисунок 13 – Положення серводвигунів у відповідності з прийнятим імпульсом

Діапазон зміни імпульсу від 1 до 2 мс. Значення 1,5 мс середнє (нейтральне). Тривалість міжканального імпульсу становить близько 0,3 мс.

За результатами дослідження була запропонована структурна схема вітчизняного комплексу повітряної розвідки з використанням захищеної системи передавання сигналів керування БПЛА (див. рис. 14).

На вимоги, що пред'являються до комплексу криптографічного захисту каналу зв'язку БПЛА з наземною станцією керування, накладають жорсткі масогабаритні обмеження. При цьому потрібно виконувати в реальному масштабі часу обчислювально ресурсомісткі операції зашифрування й розшифрування інформації криптостійким, сертифікованим в Україні, блочним алгоритмом шифрування ГОСТ 28147-89. Зокрема, для шифрування

одного блоку інформації, що складається з 8 байтів, в режимі простої заміни (електронної кодової книги) потрібне виконання 32 раундів перетворення сигналу.

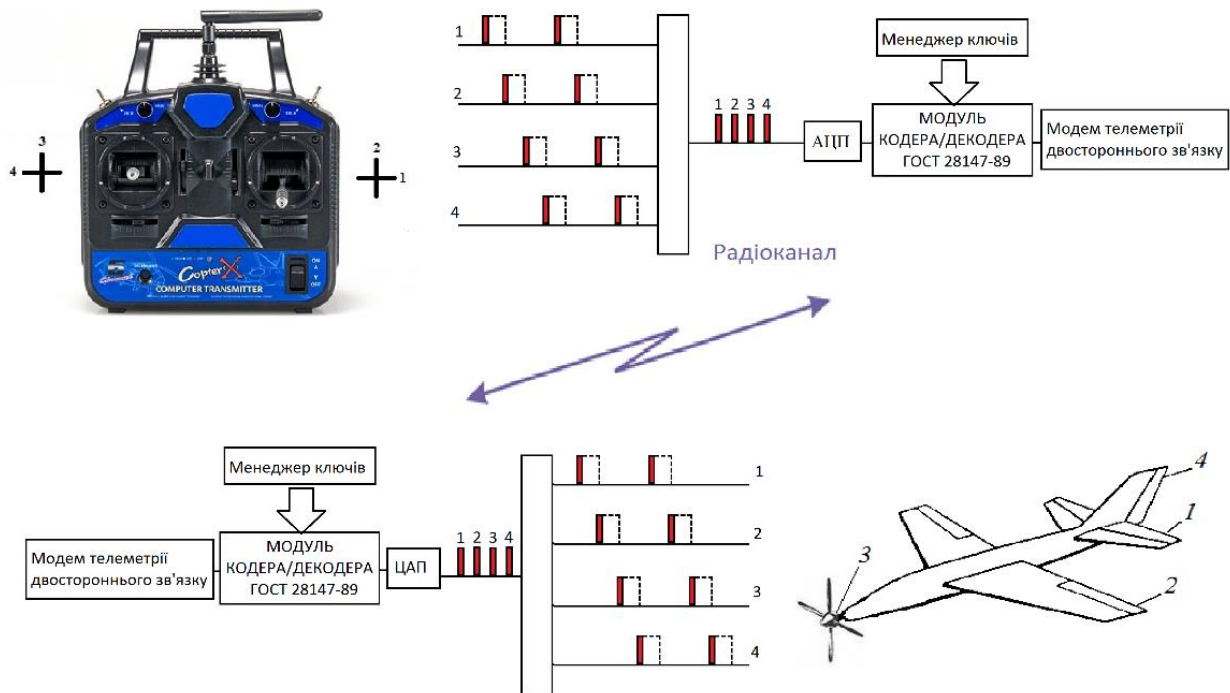


Рисунок 14 – Структурна схема захищеної системи передавання сигналів керування БПЛА

Висновок. Простий, на перший погляд, принцип моделі приймального пристрою багатоканальної системи передачі інформації, розглянутий у цій роботі, що обробляє радіосигнал з ШІМ, є основоположним у проектуванні систем керування безпілотними літальними апаратами.

Таким чином, в роботі було розглянуто проблеми застосування вітчизняної безпілотної авіації для проведення операцій з повітряної розвідки в зоні загострення військового конфлікту на сході України, принципи формування сигналу керування безпілотними літальними апаратами, переваги та недоліки використання широтно-імпульсної модуляції для передавання сигналу керування БПЛА. Створено в лабораторних умовах експериментальну модель каналу керування безпілотними літальними апаратами для аналізу форми мультиплексованої послідовності прямокутних відеоімпульсів з широтно-імпульсною модуляцією та її періоду. Довжина періоду даної послідовності становить 20 мс, що дозволяє його передавання 50 разів на секунду, діапазон зміни ширини прямокутного імпульсу ШІМ при різних положеннях джойстику наземного обладнання керування коливається від 1 мс до 2 мс, значення 1,5 мс відповідає за нейтральне положення. Також була запропонована структурна схема вітчизняного комплексу повітряної розвідки з використанням захищеної системи передавання сигналів керування БПЛА на базі досліджуваного обладнання FlySky ST-6B. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні вітчизняного комплексу повітряної розвідки з захищеною від зловмисного втручання в радіоканал «земля-борт» системою дистанційного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трубников Г. В. Беспилотные летательные аппараты и технологическая модернизация страны [Электронный ресурс] / Г. В. Трубников, В. О. Воронов. – Режим доступа : http://www.uav.ru/articles/tech_modern.pdf. – Дата доступа : сентябрь 2015. – Название с экрана.
2. Польшинкин А. В. Исследование характеристик радиоканала связи с БПЛА / А. В. Польшинкин, Х. Т. Ле // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7. – С. 98-107.

3. Кадем Р. К. Компонентный анализ беспилотных летательных аппаратов / Р. К. Кадем // Электроника та системи управління. – 2010. – № 2. – С. 45-51.
4. Толпегин О. А. Способ формирования сигнала управления системой стабилизации беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс] / О. А. Толпегин, А. А. Сизова, Т. Ю. Емельянова. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/248/2487052.html>. – Дата доступа : сентябрь 2015. – Название с экрана.
5. FS-CT6B User manual [Electronic resource] – Access mode : <http://www.flysky-cn.com/eShowProducts.asp?id=57>. – Access data : September 2015. – The title of the screen.
6. Васильков В. А. Аппаратура радиуправления. Часть 1. Передатчики [Электронный ресурс] / В. А. Васильков, В. Ю. Пузрин // RC design. – Режим доступа : http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx_intro. – Дата доступа : сентябрь 2015. – Название с экрана.
7. Dashan S. Differential Pulse-Position Modulation for Power-Efficient Optical Communication / S. Dashan, M. Joseph // IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS. – 1999. – № 47. – С. 1201-1209.
8. PPM и PCM кодирование [Электронный ресурс] // Популярная робототехника. – Режим доступа : <http://www.poprobot.ru/theory/ppm-pcm>. – Дата доступа : сентябрь 2015. – Название с экрана.
9. Голубев И. С. Основы устройства, проектирования и производства летательных аппаратов (Дистанционно-пилотируемые летательные аппараты) / И. С. Голубев, Ю. И. Янкевич. – М : МАИ, 2006. – 528 с.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2015.

REFERENCES

1. Trubnikov, G. V., Voronov, V. O. (2009), *Bespilotnyye letatel'nyye apparaty i tekhnologicheskaya modernizatsiya strany* [Unmanned aerial vehicle and technological modernization of country], available at : http://www.uav.ru/articles/tech_modern.pdf (accessed 22 September 2015).
2. Polynkin, A. V., Lee, H. T. (2013), *Issledovaniye kharakteristik radiokanala svyazi s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* [Analysis of characteristics of UAV communication link], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, No. 7, pp. 98-107.
3. Kadhim, R. K. (2010), *Komponentnyy analiz bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Component analysis of UAV], *Elektronika ta systemy upravlinnya*, No. 2, pp. 45-51.
4. Tolpegin, O. A., Sizova, A. A., Emelyanova, T. Y. *Sposob formirovaniya signala upravleniya sistemoy stabilizatsii bespilotnogo letatel'nogo apparata* [A method of forming the management signal by the system of UAV stabilizing], available at : <http://www.findpatent.ru/patent/248/2487052.html> (accessed 22 September 2015).
5. FS-CT6B User manual, available at : <http://www.flysky-cn.com/eShowProducts.asp?id=57> (accessed 22 September 2015).
6. Vasilkov, V. A., Puzrin, V. Y. (2014), *Apparatura radioupravleniya. Chast 1. [Peredatchiki Radiocontrol apparatus. Part 1. Transmitters]*, *RC design*, available at : http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx_intro (accessed 22 September 2015).
7. Dashan, S., Joseph, M. (1999), *Differential Pulse-Position Modulation for Power-Efficient Optical Communication*, *IEEE transactions on communications*, No. 47, pp. 1201-1209.
8. PPM i PCM kodirovaniye [PPM & PCM encryption], available at : <http://www.poprobot.ru/theory/ppm-pcm> (accessed 22 September 2015).
9. Golubev, I. S., Yankevich, Y. I. (2006), *Osnovy ustroystva, proyektirovaniya i proizvodstva letatel'nykh apparatov* (Distantionno-pilotiruyemye letatel'nyye apparaty) [Bases of device, planning and production of aircrafts (RPVS)], *Moscow aviation university, Moscow*, p. 528.

ДЕНИС БАХТИЯРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННОГО СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Поставлено и обосновано задание на создание отечественного комплекса воздушной разведки. Рассмотрены основные принципы формирования радиосигнала управления беспилотными летательными аппаратами в каналах передачи данных «земля-борт». Установлено преимущества использования периодической последовательности прямоугольных видеоимпульсов с широтно-импульсной модуляцией для переноса полезного информационного сигнала управления беспилотными летательными аппаратами. Проанализированы основные характеристики типичного наземного и бортового оборудования управления беспилотными летательными аппаратами. По результатам анализа проведено экспериментальное исследование мультиплексированного сигнала управления с широтно-импульсной модуляцией от наземного оборудования FlySky CT-6B. В результате исследования продемонстрировано соответствие формы канального сигнала управления положению джойстика пульта дистанционного управления и предложена структурная схема защищенной системы передачи сигналов управления БПЛА с использованием сертифицированного в Украине блочного алгоритма шифрования ГОСТ 28147-89.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, радиосигнал управления, канальный импульс, дистанционное управление, многоканальная передача информации, широтно-импульсная модуляция.

DENYS BAKHTIAROV

RESEARCH OF MULTIPLEX SIGNAL OF UAV MANAGEMENT

The problems of application of domestic UAV aviation come into question for realization of airspionage operations in the intensifying zone of military conflict on east of Ukraine. Aim of the research is to establish the form of initial radio signal for exchange of useful managing information in an uplink channel from the ground equipment of unmanned aerial vehicle (UAV) remote control; the development of flow diagram of domestic airspionage complex with the use of the protected system of control signals transfer using methods of radio signal encryption. The basic methods of rectangular video pulse sequence forming with pulse-width modulation (PWM) and their further multiplexing for transfer via UAV control radio channels are considered. Period length of this sequence is 20 ms, that allows to transfer it for 50 times on a second, the range of rectangular pulse width of PWM at different positions of the joystick of ground control equipment varies between 1 ms to 2 ms, the value of 1,5 ms is for neutral position. The form of multiplex control signal and its accordance to position of the joystick of ground equipment of UAV remote-control are determined experimentally under laboratory conditions. The flow diagram of the protected system of UAV control signals transfer is offered with the use of sectional algorithm of encryption that is certificated in Ukraine due to GOST 28147-89. Research results can be used at planning of domestic airspionage complex with the remote-control system protected from malicious interference into radio uplink channel by the system of remote-control.

Keywords: unmanned aerial vehicle, radio control, impulse channel, remote control, multi-channel communication, pulse width modulation.

Денис Ілшатович Бахтіяров, аспірант, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

E-mail: bakhtiyaroff@nau.edu.ua

Денис Илшатович Бахтияров, аспирант, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Denys Bakhtiarov, postgraduate student, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.