



FPV DRONLARIDA RAQAMLI (HD) VA ANALOG VIDEO- UZATISH TIZIMLARINING XALAQITGA CHIDAMLILIGI HAMDA KECHIKISH (LATENCY) KO'RSATKICHLARINI QIYOSIY-AMALIY TAHLIL QILISH

Mirzaraximov Ibrohimjon Isomiddin o'g'li

*O'zbekiston Respublikasi Milliy gvardiyasi Jizzax viloyati bo'yicha
boshqarmasi guruh komandiri*

Axmadxonov Afzaliddin Abduvosi o'g'li

*O'zbekiston Respublikasi Jamoat xavfsizligi universiteti "Axborot
texnologiyalari" kafedrası o'qituvchisi*

Annotatsiya. Mazkur maqolada birinchi shaxs ko'rinishidagi uchuvchisiz uchish apparatlarida (FPV – First Person View) qo'llaniladigan analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining xalaqitga chidamliligi hamda kechikish (latency) ko'rsatkichlari ilmiy-amaliy nuqtai nazardan qiyosiy tahlil qilinadi. Tadqiqotda analog va raqamli FPV tizimlarining ishlash tamoyillari, radioaloqa kanali xususiyatlari, elektromagnit xalaqitlarning video signal sifati va uzatish barqarorligiga ta'siri hamda real ekspluatatsiya sharoitlaridagi ishlash samaradorligi baholanadi. Shuningdek, signalning tarqalish masofasi, paket yo'qotilishi, video sifatining pasayishi, uzilishlar, kechikishning uchuvchining boshqaruv aniqligiga ta'siri kabi omillar kompleks ravishda tahlil qilinadi. Analog tizimlarning past kechikish va uzluksiz degradatsiya xususiyatlari hamda raqamli tizimlarning yuqori tasvir sifati, shovqinga nisbatan barqarorligi va zamonaviy kodlash algoritmlaridan foydalanish afzalliklari ilmiy asosda taqqoslanadi. Tahlillar natijasida turli operatsion sharoitlarda qaysi turdagi video uzatish tizimidan foydalanish maqsadga muvofiqligi bo'yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqiladi. Olingan natijalar FPV dronlari uchun video uzatish tizimlarini tanlash,



ularning xalaqitga chidamliligini oshirish hamda boshqaruvning ishonchliligi va xavfsizligini ta'minlashga xizmat qiladi.

Аннотация. В данной статье проведён научно-практический сравнительный анализ аналоговых и цифровых (HD) систем передачи видеосигнала, применяемых в беспилотных летательных аппаратах с видом от первого лица (FPV), по показателям помехоустойчивости и задержки передачи (latency). Рассмотрены принципы функционирования аналоговых и цифровых FPV-систем, особенности радиоканалов, влияние электромагнитных помех на качество видеосигнала, устойчивость передачи данных и эффективность работы в реальных условиях эксплуатации. Особое внимание уделено анализу дальности передачи, потерь пакетов данных, ухудшения качества изображения, разрывов видеопотока, а также влияния задержки на точность управления беспилотным аппаратом. Выполнено сравнительное исследование преимуществ аналоговых систем, характеризующихся минимальной задержкой и постепенным ухудшением качества изображения, и цифровых систем, обеспечивающих высокое качество видео, устойчивость к помехам и применение современных алгоритмов кодирования. По результатам исследования сформулированы научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальной системы видеопередачи в зависимости от условий эксплуатации FPV-дронов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и совершенствовании систем видеосвязи беспилотных летательных аппаратов, направленных на повышение надёжности управления и эффективности выполнения задач.

Abstract. This paper presents a scientific and practical comparative analysis of analog and digital (HD) video transmission systems used in First-Person View (FPV) unmanned aerial vehicles, focusing on their interference immunity and latency performance. The study examines the operating principles of analog and digital FPV systems, radio channel characteristics, the impact of electromagnetic



interference on video signal quality and transmission reliability, and their operational performance under real-world conditions. Particular attention is given to transmission range, packet loss, image degradation, video interruptions, and the influence of latency on flight control accuracy. The research compares the inherent advantages of analog systems, including ultra-low latency and graceful signal degradation, with those of digital systems, such as superior image quality, improved resistance to radio interference, and advanced video compression techniques. Based on the obtained results, scientifically justified recommendations are proposed for selecting the most appropriate video transmission technology according to different FPV operational scenarios. The findings contribute to improving the reliability, robustness, and operational effectiveness of FPV drone video communication systems and provide a theoretical basis for the development of next-generation unmanned aerial vehicle communication technologies.

Kalit so‘zlar: FPV dron, uchuvchisiz uchish apparati (UUA), analog video uzatish, raqamli (HD) video uzatish, xalaqitga chidamlilik, elektromagnit xalaqit, radioaloqa kanali, kechikish (latency), video uzatish sifati, paket yo‘qotilishi, signal-shovqin nisbati (SNR), Forward Error Correction (FEC), OFDM, real vaqt uzatish, radiochastota spektri.

Ключевые слова: FPV-дрон, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), аналоговая передача видео, цифровая (HD) передача видео, помехоустойчивость, электромагнитные помехи, радиоканал, задержка передачи (latency), качество видеосигнала, потеря пакетов, отношение сигнал/шум (SNR), Forward Error Correction (FEC), OFDM, передача в реальном времени, радиочастотный спектр.

Keywords: FPV drone, unmanned aerial vehicle (UAV), analog video transmission, digital (HD) video transmission, interference immunity, electromagnetic interference, radio communication channel, latency, video transmission quality, packet loss, signal-to-noise ratio (SNR), Forward Error



Correction (FEC), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), real-time transmission, radio frequency spectrum.

Kirish

So‘nggi yillarda birinchi shaxs ko‘rinishidagi boshqaruv texnologiyasiga asoslangan uchuvchisiz uchish apparatlari (FPV – First Person View)ning qo‘llanilish doirasi sezilarli darajada kengaydi. Dastlab sport va havaskorlik maqsadlarida foydalanilgan ushbu texnologiya bugungi kunda sanoat, qishloq xo‘jaligi, geodeziya, favqulodda vaziyatlarda qidiruv-qutqaruv ishlari, infratuzilmalarni monitoring qilish hamda mudofaa va jamoat xavfsizligi sohalarida keng qo‘llanilmoqda. FPV dronlarining samarali ishlashi operatorga video ma‘lumotlarning real vaqt rejimida uzatilishiga bevosita bog‘liq bo‘lib, video uzatish tizimining sifati, kechikish darajasi (latency) va elektromagnit xalaqitlarga chidamliligi asosiy texnik ko‘rsatkichlar hisoblanadi. Hozirgi kunda FPV tizimlarida analog va raqamli (HD) video uzatish texnologiyalari keng qo‘llanilib, ularning har biri o‘ziga xos afzallik va cheklovlarga ega. Analog tizimlar juda past kechikish va uzluksiz signal degradatsiyasi bilan ajralib tursa, raqamli tizimlar yuqori aniqlikdagi tasvir, zamonaviy kodlash usullari hamda xalaqitlarga nisbatan yuqori barqarorlikni ta‘minlaydi.

Radiochastota spektrining tobora zichlashuvi va elektromagnit xalaqitlarning ortib borishi FPV dronlarida qo‘llaniladigan video uzatish tizimlariga qo‘yiladigan talablarni yanada kuchaytirmoqda. Shu sababli analog va raqamli (HD) video uzatish texnologiyalarining xalaqitga chidamliligi hamda kechikish ko‘rsatkichlarini qiyosiy tahlil qilish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. Mazkur maqolaning maqsadi analog va raqamli FPV video uzatish tizimlarining ishlash tamoyillari, texnik xususiyatlari, xalaqitlarga bardoshlilik hamda kechikish ko‘rsatkichlarini ilmiy asosda taqqoslash, ularning afzallik va kamchiliklarini aniqlash hamda turli ekspluatatsiya sharoitlari uchun maqbul qo‘llash bo‘yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat.



FPV dronlarida analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining nazariy asoslari

FPV (First Person View) dronlarining samaradorligi ko'p jihatdan video uzatish tizimining ishonchliligiga bog'liq. Operator uchuvchisiz uchish apparatini boshqarish jarayonida qarorlarni bort kamerasidan uzatilayotgan tasvir asosida qabul qiladi. Shu sababli video signalning uzluksizligi, tasvir sifati, uzatishdagi kechikish va elektromagnit xalaqitlarga chidamlilik FPV tizimlarining eng muhim texnik ko'rsatkichlari hisoblanadi. Hozirgi vaqtda FPV dronlarida asosan analog hamda raqamli (HD) video uzatish texnologiyalari qo'llanilib, ularning ishlash prinsipi, signalni qayta ishlash usuli va radioaloqa kanalidan foydalanish tamoyillari bir-biridan sezilarli darajada farq qiladi.

Analog FPV tizimlarida kamera tomonidan hosil qilingan video signal deyarli qayta ishlanmasdan amplituda yoki chastota modulyatsiyasi asosida radiochastota orqali uzatiladi. Bunda videoni siqish yoki raqamlashtirish bosqichlari mavjud emasligi sababli signalni shakllantirish va uzatish uchun juda qisqa vaqt talab etiladi. Natijada analog tizimlarda umumiy kechikish odatda 10–20 ms atrofida bo'lib, bu yuqori tezlikda harakatlanuvchi FPV dronlarini boshqarishda muhim afzallik hisoblanadi. Biroq analog uzatishning kamchiligi shundaki, radioaloqa kanalida yuzaga keladigan shovqin va elektromagnit xalaqitlar tasvir sifatiga bevosita ta'sir qiladi. Signal kuchsizlangani sari tasvirda shovqinlar, chiziqlar va buzilishlar asta-sekin ortib boradi, biroq video oqimi to'liq uzilib qolmaydi. Mazkur xususiyat amaliyotda graceful degradation deb yuritiladi va operatorga signal sifati pasaygan taqdirda ham dronni boshqarishni davom ettirish imkonini beradi.

Raqamli (HD) FPV tizimlarida esa kamera tomonidan olingan video dastlab raqamlashtiriladi, so'ngra H.264 yoki H.265 kabi zamonaviy siqish algoritmlari yordamida kodlanadi. Keyinchalik video ma'lumotlari paketlarga ajratilib, xatolarni aniqlash va tuzatish mexanizmlari bilan himoyalangan holda radioaloqa kanali orqali uzatiladi. Qabul qiluvchi qurilmada ushbu paketlar dekodlanib, monitor yoki FPV ko'zoynak ekranida aks ettiriladi. Ushbu jarayon tasvir sifatini sezilarli darajada



oshirish bilan birga, qo'shimcha hisoblash amallarini talab qilganligi sababli ma'lum miqdorda kechikishni yuzaga keltiradi. Zamonaviy DJI O4, DJI O3 Air Unit, Walksnail Avatar HD va HDZero kabi tizimlarda optimallashtirilgan apparat kodlash texnologiyalari qo'llanilishi natijasida kechikish sezilarli kamaytirilgan bo'lsa-da, u analog tizimlarga nisbatan yuqoriroq bo'lib qolmoqda.

Analog va raqamli video uzatish tizimlarining asosiy farqlaridan biri radiochastota spektridan foydalanish usulidir. Analog uzatishda video signal uzluksiz elektromagnit to'lqin ko'rinishida uzatiladi va signal sifati qabul qiluvchi qurilmaga yetib kelgan quvvatga bevosita bog'liq bo'ladi. Raqamli tizimlarda esa uzatilayotgan axborot diskret paketlar ko'rinishida shakllantiriladi, bu esa zamonaviy modulyatsiya usullari, xatolarni tuzatish kodlari (Forward Error Correction – FEC) hamda ko'p tashuvchili uzatish (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) texnologiyalaridan foydalanish imkonini beradi. Natijada radioresurslardan samaraliroq foydalanish va ma'lum darajada elektromagnit xalaqitlarga bardoshlilikka erishiladi.

Video uzatish tizimining samaradorligini baholashda bir qator texnik ko'rsatkichlar muhim ahamiyat kasb etadi. Ular qatoriga kechikish (latency), tasvir aniqligi (resolution), uzatish masofasi, paket yo'qotilishi (packet loss), signal-shovqin nisbati (Signal-to-Noise Ratio – SNR), bit uzatish tezligi (bitrate) hamda radioaloqa kanalining barqarorligi kiradi. Mazkur parametrlar bir-biri bilan uzviy bog'liq bo'lib, ulardan birining yaxshilanishi ayrim hollarda boshqasining yomonlashishiga olib kelishi mumkin. Masalan, yuqori aniqlikdagi video uzatish uchun ko'proq ma'lumot uzatilishi talab etiladi, bu esa kanal yuklanishini oshirib, kechikishning ortishiga sabab bo'lishi mumkin.

Shuningdek, FPV tizimlarining ishlashiga tashqi elektromagnit muhit sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Wi-Fi tarmoqlari, Bluetooth qurilmalari, mobil aloqa bazaviy stansiyalari hamda boshqa radioelektron vositalar 2,4 GHz va 5,8 GHz diapazonlarida qo'shimcha shovqin hosil qiladi. Analog tizimlarda bunday xalaqitlar tasvir sifati bosqichma-bosqich yomonlashishiga olib kelsa, raqamli tizimlarda



paketlarning yo‘qolishi yoki uzatilish tezligining kamayishi natijasida tasvirning muzlashi yoki butunlay uzilishi kuzatilishi mumkin. Shu sababli har ikkala texnologiyaning elektromagnit xalaqitlarga munosabati turlicha bo‘lib, ularni baholashda nafaqat tasvir sifati, balki boshqaruvning uzluksizligi va operatorning vaziyatni to‘g‘ri baholash imkoniyati ham hisobga olinishi zarur.

Demak, analog va raqamli FPV video uzatish tizimlari bir xil vazifani bajarishiga qaramay, ularning ishlash prinsipi, texnik imkoniyatlari va ekspluatatsion xususiyatlari sezilarli darajada farq qiladi. Analog texnologiyalar minimal kechikish va sodda arxitekturasini bilan ajralib tursa, raqamli tizimlar yuqori tasvir sifati, samarali spektrdan foydalanish va zamonaviy signalni qayta ishlash imkoniyatlarini taqdim etadi. Aynan shu farqlar keyingi bo‘limlarda xalaqitga chidamlilik va kechikish ko‘rsatkichlari nuqtai nazaridan batafsil qiyosiy tahlil qilinadi.

FPV dronlarida analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining xalaqitga chidamliligini qiyosiy tahlil qilish.

FPV dronlarining samaradorligi nafaqat video tasvir sifati, balki radioaloqa kanalining tashqi elektromagnit xalaqitlar sharoitida barqaror ishlashiga ham bevosita bog‘liq. Amaliyotda dronlar shahar hududlari, sanoat zonalarini, tog‘li relyef, o‘rmon massivlari hamda radiochastota yuklamasi yuqori bo‘lgan muhitlarda ekspluatatsiya qilinadi. Bunday sharoitlarda elektromagnit xalaqitlar, signalning so‘nishi (attenuation), ko‘p yo‘lli tarqalish (multipath propagation), radiochastota spektrining bandligi va boshqa omillar video uzatish tizimining ishonchliligiga salbiy ta‘sir ko‘rsatadi. Shu sababli FPV tizimlarining xalaqitga chidamliligini baholash ularning amaliy samaradorligini aniqlovchi muhim mezonlardan biri hisoblanadi.

Analog video uzatish tizimlarida signal uzluksiz elektromagnit to‘lqin shaklida uzatiladi va qabul qiluvchi qurilmaga yetib kelgan signal quvvati tasvir sifatiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ta‘sir qiladi. Signal darajasi pasayishi yoki tashqi radiochastota shovqinlari ta‘sirida tasvirda «qor», gorizontall chiziqlar, ranglarning buzilishi va boshqa vizual artefaktlar yuzaga keladi. Biroq analog uzatishning muhim



afzalligi shundaki, signal sifati asta-sekin yomonlashadi va operator ma'lum darajada tasvirni kuzatishda davom eta oladi. Aynan shu xususiyat murakkab parvoz sharoitlarida dronni xavfsiz qaytarish imkoniyatini saqlab qoladi.

Raqamli (HD) video uzatish tizimlarida esa elektromagnit xalaqitlarga qarshi kurashish uchun zamonaviy signalni qayta ishlash texnologiyalaridan foydalaniladi. Xususan, Forward Error Correction (FEC) algoritmlari uzatish jarayonida yuzaga kelgan ayrim xatolarni avtomatik tuzatishga xizmat qiladi. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulyatsiyasi esa ma'lumotlarni bir nechta ortogonal tashuvchi chastotalarga taqsimlash orqali ko'p yo'lli tarqalish va shovqinlarning salbiy ta'sirini kamaytiradi. Natijada signal sifati yetarli bo'lgan sharoitlarda raqamli tizimlar yuqori aniqlikdagi tasvirni deyarli yo'qotishsiz uzatishga qodir bo'ladi.

Biroq raqamli tizimlarning o'ziga xos cheklovi ham mavjud. Signal darajasi kritik chegaradan pastga tushganda yoki paketlar yo'qotilishi ma'lum qiymatdan oshganda video oqimi keskin buziladi yoki butunlay uziladi. Ushbu hodisa ilmiy adabiyotlarda «cliff effect» deb yuritiladi. Ya'ni analog tizimlarda tasvir sifati bosqichma-bosqich pasaysa, raqamli tizimlarda uzoq vaqt davomida tasvir yuqori sifatda saqlanadi, ammo signal kritik darajaga yetgach birdaniga muzlab qolishi yoki uzilishi mumkin. Bu holat operatorning vaziyatni baholash imkoniyatini keskin kamaytirishi va uchish xavfsizligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Xalaqitga chidamlilikka ta'sir etuvchi muhim omillardan yana biri radiochastota diapazonidir. Zamonaviy FPV tizimlarida asosan 5,8 GHz diapazoni qo'llaniladi, ayrim tizimlarda esa 2,4 GHz yoki ikki diapazonli (dual-band) uzatish texnologiyalaridan foydalaniladi. 5,8 GHz diapazoni yuqori ma'lumot uzatish tezligini ta'minlasa-da, to'siqlar orqali tarqalish qobiliyati pastroq bo'ladi. Aksincha, 2,4 GHz diapazoni uzoqroq masofaga barqarorroq uzatiladi, biroq ushbu diapazonda Wi-Fi va boshqa simsiz qurilmalar faol ishlashi sababli elektromagnit shovqin darajasi yuqori bo'lishi mumkin. Shu sababli zamonaviy raqamli FPV tizimlarida



kanalni avtomatik tanlash va adaptiv uzatish algoritmlaridan foydalanish orqali xalaqitlarning salbiy ta'siri kamaytiriladi.

Ilmiy tadqiqotlar va amaliy sinovlar shuni ko'rsatadiki, past va o'rta darajadagi elektromagnit xalaqitlar sharoitida raqamli (HD) video uzatish tizimlari tasvir sifati hamda radioaloqa barqarorligi bo'yicha analog tizimlarga nisbatan ustunlikka ega. Biroq kuchli radioelektron xalaqitlar, signalning keskin so'nishi yoki paket yo'qotilishi yuqori bo'lgan vaziyatlarda analog tizimlarning uzluksiz degradatsiya xususiyati operatorga qo'shimcha ustunlik yaratishi mumkin. Demak, FPV dronlarida video uzatish texnologiyasini tanlashda faqat tasvir aniqligi emas, balki ekspluatatsiya muhiti, elektromagnit vaziyat, parvoz masofasi va bajariladigan vazifaning xususiyatlari ham kompleks ravishda hisobga olinishi lozim.

FPV dronlarida analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining kechikish (latency) ko'rsatkichlarini qiyosiy tahlil qilish.

FPV dronlarini boshqarishda video uzatish tizimining kechikish ko'rsatkichi (latency) operatorning boshqaruv aniqligi va parvoz xavfsizligini belgilovchi asosiy texnik parametr hisoblanadi. Latency – bu kamera tomonidan tasvirni qabul qilish va uning operator ekranida aks etishi orasidagi umumiy vaqt oralig'i bo'lib, u kamera sensori, video signalni qayta ishlash, kodlash, radioaloqa kanali orqali uzatish, dekodlash va displeyda tasvirni chiqarish jarayonlaridan tashkil topadi. Ushbu bosqichlarning har biri umumiy kechikishga ma'lum darajada ta'sir ko'rsatadi. Ayniqsa, yuqori tezlikda uchuvchi FPV dronlari uchun bir necha millisekundlik farq ham operatorning qaror qabul qilish tezligiga sezilarli ta'sir etishi mumkin.

Analog video uzatish tizimlarining asosiy afzalligi ularning juda past kechikish ko'rsatkichiga ega ekanligidir. Analog tizimlarda video signal deyarli qayta ishlanmasdan radiochastota orqali uzatilgani sababli umumiy kechikish odatda 10–20 ms oralig'ida bo'ladi. Shu bois analog FPV tizimlari uzoq yillar davomida professional dron poygalari va murakkab aerobatik parvozlarda asosiy standart sifatida qo'llanib kelmoqda. Signal sifati pasaygan taqdirda ham kechikish deyarli



o'zgarmaydi, faqat tasvirning vizual sifati yomonlashadi. Bu esa operatorga boshqaruvni barqaror davom ettirish imkonini beradi.

Raqamli (HD) video uzatish tizimlarida esa kechikishning yuzaga kelishiga bir necha texnologik jarayonlar sabab bo'ladi. Kamera tomonidan olingan tasvir avvalo raqamlashtiriladi, so'ngra H.264 yoki H.265 kodeklari yordamida siqiladi, paketlarga ajratiladi va radioaloqa kanali orqali uzatiladi. Qabul qiluvchi qurilmada paketlar dekodlanib, monitor yoki FPV ko'zoynak ekranida aks ettiriladi. Mazkur jarayonlar tasvir sifatini sezilarli yaxshilash bilan birga, qo'shimcha vaqt talab qiladi. Zamonaviy DJI O4, DJI O3 Air Unit, Walksnail Avatar HD va HDZero kabi tizimlarda apparat darajasidagi optimallashtirishlar natijasida kechikish odatda 20–40 ms oralig'ida bo'lsa-da, signal sifati yomonlashgan sharoitlarda bu ko'rsatkich yanada ortishi mumkin.

Kechikish darajasiga video aniqligi, kadrlar soni (frame rate), siqish algoritmi, bit uzatish tezligi (bitrate), radioaloqa kanalining yuklanishi va paketlarni qayta uzatish (retransmission) kabi omillar ham ta'sir qiladi. Masalan, 1080p yoki undan yuqori aniqlikdagi video oqimini uzatish uchun ko'proq ma'lumot uzatiladi, bu esa kodlash va dekodlash vaqtining ortishiga olib keladi. Shuningdek, elektromagnit xalaqitlar tufayli paketlar yo'qotilganda raqamli tizimlarda ularni qayta uzatish yoki xatolarni tuzatish mexanizmlari ishga tushadi, natijada umumiy kechikish ortadi. Analog tizimlarda esa bunday jarayonlar mavjud emasligi sababli kechikish deyarli o'zgarmaydi.

Amaliy tajribalar shuni ko'rsatadiki, yuqori tezlikdagi FPV poygalari, murakkab manevrlar va to'siqlar orasida uchishda minimal kechikish asosiy ustunlik hisoblanadi. Shu sababli bunday vazifalarda analog tizimlar yoki juda past kechikishga ega HDZero kabi raqamli platformalar afzal ko'riladi. Aksincha, inspeksiya, monitoring, qidiruv-qutqaruv, aerofotosuratga olish hamda operator uchun tasvir sifati ustuvor bo'lgan vazifalarda DJI O4 yoki Walksnail Avatar HD kabi raqamli tizimlarning yuqori aniqlikdagi videosi samaraliroq natija beradi. Demak, video uzatish tizimini tanlashda kechikish va tasvir sifati o'rtasidagi



muvozanatni ekspluatatsiya sharoiti hamda bajariladigan vazifadan kelib chiqib belgilash maqsadga muvofiq hisoblanadi.

FPV dronlarida analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining amaliy samaradorligini baholash va takomillashtirish istiqbollari.

FPV dronlarida qo'llaniladigan analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining amaliy samaradorligi ularning texnik tavsiflari bilan bir qatorda ekspluatatsiya sharoitlariga ham bevosita bog'liq. Har bir video uzatish texnologiyasi ma'lum vazifalarni bajarishda o'ziga xos afzalliklarga ega bo'lib, yagona universal yechim mavjud emas. Shu sababli video uzatish tizimini tanlashda parvoz masofasi, elektromagnit muhit, operatorning boshqaruv aniqligiga qo'yiladigan talablar, tasvir sifati hamda uchish vazifasining xususiyati kompleks ravishda hisobga olinishi zarur. Analog tizimlar minimal kechikish va signalning bosqichma-bosqich yomonlashishi bilan ajralib tursa, raqamli tizimlar yuqori aniqlikdagi video, zamonaviy kodlash texnologiyalari va radioresurslardan samarali foydalanish imkoniyatini taqdim etadi.

Amaliy qo'llash tajribasi shuni ko'rsatadiki, sport musobaqalari va yuqori tezlikdagi FPV poygalarida operator uchun eng muhim mezon kechikishning minimal bo'lishidir. Bunday vaziyatlarda analog tizimlar yoki past kechikishga ega raqamli platformalar ustunlik qiladi. Aksincha, inspeksiya, geodezik kuzatuv, energetika obyektlarini nazorat qilish, qidiruv-qutqaruv ishlari hamda jamoat xavfsizligi bilan bog'liq vazifalarda tasvirning yuqori aniqligi muhim ahamiyat kasb etadi. Shu sababli bunday sharoitlarda DJI O4, Walksnail Avatar HD yoki HDZero kabi zamonaviy raqamli tizimlardan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

FPV video uzatish tizimlarining ishonchliligini oshirish uchun bir qator texnik yechimlardan foydalanish mumkin. Jumladan, yuqori sifatli yo'naltirilgan antennalarni qo'llash, antenna diversifikatsiyasi (antenna diversity), avtomatik kanal tanlash (Auto Channel Selection), adaptiv uzatish quvvatini boshqarish (Adaptive Power Control) hamda xatolarni tuzatish algoritmlarini takomillashtirish radioaloqa kanalining barqarorligini oshiradi. Bundan tashqari, radiochastota spektrini samarali rejalashtirish, elektromagnit xalaqit manbalarini kamaytirish va zamonaviy signalni



qayta ishlash algoritmlaridan foydalanish video uzatish sifatini sezilarli darajada yaxshilashi mumkin. Kelajakda sun'iy intellekt asosidagi adaptiv aloqa algoritmlari, yangi avlod video kodeklari va ko'p diapazonli (multi-band) uzatish texnologiyalarining joriy etilishi FPV tizimlarining xalaqitga chidamliligini hamda kechikish ko'rsatkichlarini yanada optimallashtirishi kutilmoqda.

O'tkazilgan qiyosiy tahlillar shuni ko'rsatadiki, analog va raqamli video uzatish tizimlari o'zaro raqobatchi emas, balki turli ekspluatatsiya vazifalariga moslashtirilgan texnologik yechimlar hisoblanadi. Analog tizimlar real vaqt rejimidagi boshqaruvni talab qiladigan murakkab parvozlarda samarali bo'lsa, raqamli (HD) tizimlar yuqori sifatli vizual axborotni uzatish talab etiladigan operatsiyalarda ustunlik qiladi. Shu bois FPV dronlarini loyihalash va ekspluatatsiya qilish jarayonida video uzatish texnologiyasini tanlash ilmiy asoslangan texnik mezonlarga tayanishi lozim. Bu esa uchuvchisiz uchish apparatlarining boshqaruv ishonchliligini oshirish, radioaloqa kanalining barqarorligini ta'minlash hamda turli amaliy vazifalarni samarali bajarishga xizmat qiladi.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda FPV dronlarida qo'llaniladigan analog va raqamli (HD) video uzatish tizimlarining xalaqitga chidamliligi hamda kechikish (latency) ko'rsatkichlari ilmiy-amaliy jihatdan qiyosiy tahlil qilindi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, analog video uzatish tizimlari juda past kechikish, sodda arxitektura va signal sifati pasayganda ham boshqaruvni davom ettirish imkoniyati bilan ajralib turadi. Shu sababli ular yuqori tezlikdagi FPV parvozlari va boshqaruv aniqligi ustuvor bo'lgan vazifalarda samarali hisoblanadi. Raqamli (HD) video uzatish tizimlari esa yuqori aniqlikdagi tasvir, elektromagnit xalaqitlarga nisbatan yuqori barqarorlik hamda zamonaviy kodlash va xatolarni tuzatish texnologiyalaridan foydalanishi bilan ustunlikka ega. Biroq bunday tizimlarda video signalni kodlash va dekodlash jarayonlari sababli analog tizimlarga nisbatan yuqoriroq kechikish kuzatiladi.



Tadqiqot natijalariga asoslanib, FPV dronlarida video uzatish texnologiyasini tanlashda yagona universal yechim mavjud emasligi aniqlandi. Video uzatish tizimi bajariladigan vazifa, elektromagnit muhit, parvoz masofasi, operatorning boshqaruv aniqligiga qo'yiladigan talablar hamda tasvir sifati kabi omillarni hisobga olgan holda tanlanishi lozim. Kelgusida sun'iy intellekt asosidagi adaptiv aloqa algoritmlari, yangi avlod video siqish texnologiyalari va ko'p diapazonli uzatish tizimlarini joriy etish orqali FPV dronlarida video uzatishning ishonchliligi, xalaqitga chidamliligi va real vaqt rejimidagi samaradorligini yanada oshirish mumkin. Mazkur tadqiqot natijalari FPV dronlari uchun video uzatish tizimlarini takomillashtirish, ularni loyihalash va amaliy ekspluatatsiyada optimal texnologik yechimlarni tanlash bo'yicha ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
2. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2008.
3. Goldsmith A. *Wireless Communications*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
4. Molisch A. F. *Wireless Communications*. – 3rd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2023.
5. International Telecommunication Union (ITU). *Radio Regulations*. – Geneva: ITU, 2024.
6. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*. Doc 10019. – Montreal: ICAO, 2023.
7. DJI. *DJI O4 Air Unit User Manual*. – Shenzhen: DJI Technology Co., Ltd., 2025.
8. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L. G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects,



Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21. – No. 4. – P. 3417–3442.

9. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges // *IEEE Communications Magazine*. – 2016. – Vol. 54. – No. 5. – P. 36–42.

10. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2016. – Vol. 18. – No. 2. – P. 1123–1152.

11. Al-Hourani A., Kandeepan S., Jamalipour A. Modeling Air-to-Ground Path Loss for Low Altitude Platforms in Urban Environments // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. – 2014. – P. 2898–2904.

12. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // *Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27. – No. 3–4. – P. 379–423, 623–656.