

Model usmerjanja podatkov v omrežjih dronov

Štefan Klemenčič in Mojca Ciglarič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mojca.ciglaric@fri.uni-lj.si

Povzetek. Delo raziskuje načine usmerjanja podatkovnih paketov v omrežjih dronov, če se droni uporabljajo kot mobilna omrežna vozlišča za zagotavljanje povezljivosti napravam interneta stvari na območjih, kjer drugačna povezljivost ni na voljo. V delu je predstavljen model sistema, predlagana sta dva temeljna načina usmerjanja in dva osnovna načina premikanja dronov. Predstavljeno je namensko razvito orodje za simulacijo, v katerem so implementirani predlagani model sistema ter oba načina usmerjanja paketov in premikanja dronov. Podani so rezultati simulacij, ki potrjujejo ustreznost modela in osvetlujejo primernost predlaganih načinov usmerjanja. V zaključku so podane smernice za nadaljnje raziskave.

Ključne besede: omrežje dronov, odložljivo omrežje, usmerjanje

A System Model for Data Routing in Drone Networks

In this work, we explore the possibility of using drone networks to ensure the internet connectivity to IoT devices located in a larger geographical area with no Internet or other connections. The motivation for our work is a scenario of an early warning of forest fires in remote areas with no or with an intermittent GSM network coverage, where data from sensors are transmitted by drones to areas with network access. The paper proposes a model of such drone network, offering an insight into the possibilities for data routing from drone to drone to the point where Internet access is provided.

After reviewing the field and the related research, we present the basic building blocks of the system and their properties: cells, drones, charging stations, network access points, and IoT devices or sensors. As drones are mobile network nodes, the data routing between drones represents the rules for when and to which neighboring drone the data is transmitted at a meeting of two drones. Our two basic routing algorithms are analogous with depth- or breadth-first search in graphs. The first is epidemic routing (flooding) where the data is passed on to all the neighbors, while in first-meeting routing, the data is passed on only to the first-met neighbor. The drone movement is important because it determines which of its neighbors the drone will meet. In our model, we use two types of movement, i.e. random movement and two-phase movement. In the two-phase movement, the drone first explores the entire surface of the cell in concentric circles, and then stays at the edge of the cell to meet the neighboring drones. After that, the drone visits all the IoT devices inside the cell again.

The routing and drone movement are implemented with our simulation tool and the results confirm the suitability of the our system model as well as offer insight into both routing algorithms. Although not ideal, they are a viable alternative and, more importantly, they present a baseline for evaluation of future routing algorithms developed dedicatedly for the drone networks.

Keywords: drone network, delay-tolerant network, routing

1 UVOD

S širitvijo uporabe interneta stvari (IoT) se v internet povezujejo zelo raznolike naprave. Mednje sodijo senzori in aktuatorji, njihovim zmogljivostim primerno pa izbiramo tudi komunikacijske tehnologije. Cilj računalništva na robu omrežja (angl. Edge Computing) je s pomočjo pametnejših robnih naprav zagotoviti manjše zakasnitve pri prenosu, povečati hitrost prenosa podatkov in razbremenitev jedrnega omrežja ter omogočiti lokalno izvajanje določenih aplikacij.

Pogosto so senzori in druge naprave interneta stvari baterijsko napajani in zaradi varčevanja z energijo dlje časa izključeni. Druge naprave so lahko mobilne in spreminjajo svojo fizično lokacijo. Če takšne naprave vsaj občasno služijo tudi kot omrežna vozlišča, njihovi izpadi ali premestitve lahko povzročijo razpad omrežja v med seboj nepovezane dele. Za zagotavljanje komunikacije v takih omrežjih poznamo posebne protokole, ki omogočajo, da paketi počakajo na vozliščih, dokler ni povezljivost ponovno vzpostavljena.

Taka omrežja imenujemo odložljiva omrežja (angl. Delay Tolerant Network, DTN). Cilj odložljivih omrežij je torej zagotoviti prenos podatkov tudi v primeru prekinitev v omrežni povezljivosti vozlišč, usmerjevalni protokoli pa temeljijo na načelu shrani in posreduj.

Odložljiva omrežja se uporabljajo na odročnih in neposeljenih področjih, v avtomobilskih omrežjih, podvodnih omrežjih, komunikacijah v globokem vesolju, komunikacijah v izrednih razmerah in podobno.

V tem delu raziskujemo možnost uporabe omrežij dronov za zagotavljanje povezljivosti napravam interneta stvari, ki so razmeščene po večjem geografskem področju brez povezljivosti v internet in tudi brez povezljivosti med seboj. Motivacija za naše delo so

scenariji, kjer omrežje dronov deluje kot omrežna hrbtnica, npr. v [13]. V tem delu je opisan scenarij zgodnjega obveščanja o gozdnih požarih na težko dostopnih in oddaljenih območjih, kjer podatke s senzorjev prenašajo ravno droni. Vendar pa v tem članku in v drugi literaturi ne srečamo niti modela takšnega omrežja dronov niti vpogleda v način usmerjanja podatkov med droni do točke, kjer je zagotovljen prehod v internet.

Pri uporabi drona naletimo na številne praktične probleme, kot so omejen domet komunikacije, omejen domet letenja, potreba po baterijskem napajanju in posledično nizka avtonomija delovanja ter relativno dolgi časi polnjenja. Za doseganje boljše povezanosti in pokrivanje večjih področij se je porodila ideja o regionalnem povezovanju dronov med seboj v mobilno omrežje dronov. To področje je še zelo neraziskano in prinaša številne probleme in izzive.

Namen tega članka je predstaviti model odložljivega omrežja dronov, ki je namenjeno za prenos podatkov z naprav interneta stvari do prehoda v omrežje. Model je namenjen proučevanju usmerjevalnih protokolov za podatkovne pakete v omrežju dronov. V skladu z modelom bomo razvili simulacijsko okolje, v katerem bomo simulirali dva osnovna tipa usmerjanja in premikanja dronov v dveh omrežjih dronov različnih velikosti. Predstavili bomo rezultate simulacij in z njihovo pomočjo komentirali zasnovo omrežij dronov ter podali usmeritve za razvoj usmerjevalnih protokolov za omrežja dronov. Simulirana usmerjevalna protokola bosta osnova za primerjanje s prihodnjimi usmerjevalnimi protokoli, ki bodo namensko razviti prav za takšna omrežja.

2 PREGLED PODROČJA

V tem razdelku predstavljamo pregled literature s področja uporabe dronov in lastnosti odložljivih omrežij (DTN), še zlasti pri uporabi dronov.

S. Toumpis v [1] napove, da bodo celična in odložljiva omrežja ključna za zagotovitev delovanja rojev dronov zlasti na območjih brez komunikacijske infrastrukture in v aplikacijah, kjer zakasnitve dostave niso tako pomembne (npr. pri spremljanju stanja v okolju).

Khan in soavtorji [2] podajajo pregled brezžičnih komunikacijskih tehnologij, ki se lahko uporabljajo za komunikacijo med droni oz. med dronom in infrastrukturo. Tehnologije so podrobno klasificirane, navedene pa so tudi njihove prednosti in slabosti.

Guillen-Perez in soavtorji [3] testirajo dva načina obratovanja vozlišča Wi-Fi, ki ga predstavlja dron. Vozlišče Wi-Fi je lahko bodisi dostopna točka v infrastrukturnem načinu bodisi vozlišče v ad hoc načinu. Pri tem načina primerjajo po dosegu komunikacije, hitrosti prenosa podatkov in energijski učinkovitosti. Rezultati testiranja kažejo, da infrastrukturni način zagotavlja večji doseg komunikacije in hitrost prenosa podatkov, ad hoc način pa porablja manj energije. Rodrigues v [4] pregledno predstavi odložljiva omrežja.

Uchida in soavtorji v [5] prikažejo način uporabe drona za zagotavljanje komunikacije v primeru naravnih nesreč. V scenariju dron avtonomno leti in obenem išče naprave. Če najde napravo, poskuša s triangulacijo izračunati njeno lokacijo, prileti do nje in izmenja podatke. Nato išče nove naprave, dokler se baterija ne izprazni toliko, da se še lahko vrne do polnilne postaje.

Gianinni [6] uporabi odložljiva omrežja za zagotavljanje prenosa podatkov v mestu. Cilj je prenašati podatke različnih senzorjev v stavbah po mestu do okrožnega koncentratorja. Za namen prenašanja podatkov se lahko kot vozlišča odložljivega omrežja uporabljajo avtobusi, avtomobili in mobilni telefoni mimoidočih meščanov. Zaradi nepokritosti oz. redke obiskanosti določenih stavb avtorji poleg tega predlagajo še uporabo drona. Ugotavljajo, kdaj je najboljši trenutek za začetek leta drona, da se zagotovi največja verjetnost dostave podatkov.

Bae in soavtorji [7] predstavijo možnost uporabe drona kot prehoda (angl. Drone-as-a-Gateway, DaaG) za prenašanje podatkov v brezžičnih senzorskih in aktuatorskih omrežjih. Obravnavali so scenarij z dvema območjema na razdalji, ki preprečuje neposredno izmenjavo podatkov. V enem območju so senzorji in v drugem aktuatorji. Simulirali so prenašanje podatkov s pomočjo enega drona in s pomočjo večjega števila dronov. Ob uporabi enega drona pobira podatke senzorjev in jih nosi do omrežja aktuatorjev. Ob uporabi večjega števila dronov pa ti lebdijo v zraku med območjema, si izmenjujejo podatke in tako tvorijo povezavo z več skoki. Izveden je bil tudi terenski preizkus z enim dronom. Rezultati so potrdili praktično uporabnost in potencial uporabe dronov za prenos podatkov.

V članku [9] je podrobno predstavljen Urban Delay Tolerant Network Simulator, ki je namenjen simuliranju odložljivih omrežij v mestnih cestnih okoljih. Ker je gibanje omejeno na ceste, predstavljeni modeli mobilnosti in usmerjevalni protokoli niso neposredno uporabni v omrežjih dronov.

Chen s soavtorji [8] raziskuje komunikacijo med droni v letelih ad hoc omrežjih (angl. Flying Ad hoc Networks – FANET), kadar roje visoko avtonomnih dronov pošiljamo na misije, ki jih izvedejo z enim polnjenjem. Droni so opazovani le med letenjem, in ker polnjenje ni predvideno, sta model sistema in primer uporabe značilno drugačna od opisanega v tem članku.

Moura s soavtorji [10] raziskuje uporabo vodnih dronov, osredotočajo se na zanesljivo dostavo paketov med droni, ne poskušajo pa zagotoviti povezanosti nepremičnim napravam IoT.

Poikonen in Campbell [11] podajata pregled uporabe usmerjanja dronov, vendar se področje nanaša predvsem na fizično usmerjanje (premikanje) dronov na primer za dostavo dobrin ali za vizualni pregled dolžinskih objektov (cefovodi, ceste), ne pa z namenom učinkovite dostave podatkov preko dronov. Pregled ne zajema dronov kot omrežnih vozlišč.

Bushnaq s soavtorji [13] opisuje scenarij, kjer letišči droni zbirajo podatke s senzorjev na tleh v gozdovih na

oddaljenih in nedostopnih območjih z namenom zgodnjega zaznavanja in preprečevanja širjenja gozdnih požarov. Avtorji ne opisujejo, kako se podatki prenašajo med droni in do kontrolnega centra, scenarij uporabe pa je zelo primeren za naš model in usmerjanje.

3 MODEL OMREŽJA DRONOV

V tem razdelku so opisani osnovni gradniki našega omrežja, nato pa še model komunikacije med njimi.

3.1 Osnovni gradniki sistema

IoT-naprava je naprava (pogosto senzor), ki je sposobna komunicirati po medmrežju in oddaja ali sprejema podatke. Vsaka naprava IoT v našem modelu ima določeno lokacijo in intenzivnost generiranja podatkov (zanima nas bodisi število paketov na časovno enoto ali pa čas med dvema zaporednima paketoma). Predpostavljamo, da ima vsaka naprava na razpolago pomnilnik za pakete, pripravljene za oddajo dronu, ter pomnilnik za pakete, sprejete od drona. V simulaciji vsebino teh dveh pomnilnikov predstavljata seznam paketov, čakajočih na prevzem, in seznam prejetih paketov.

Dron oziroma brezpilotno zračno plovilo je letalo brez posadke, ki deluje avtonomno. Droni so baterijsko napajani, zato imajo omejeno avtonomijo. V tem delu se bomo omejili na manjše komercialno dostopne drone za civilne namene. Ti droni imajo relativno nizko avtonomijo – nekje do 30 minut, polnijo pa se od 60 do 210 minut. Hitrosti, ki jih dosegajo, so največkrat od 14 do 25 m/s oz. od 50 do 90 km/h.

Parametre drona razvrščamo v več skupin:

- **Polnjenje drona:** Pomembna parametra sta čas polnjenja in lokacija najbližje polnilne postaje (oziroma matične postaje), kamor dron lahko odleti.
- **Letenje drona:** Pomembni parametri so največja hitrost, najdaljši čas letenja in najdaljši doseg letenja. Ti trije parametri so med seboj odvisni, saj hitrost in čas letenja skupaj določata prepotovano pot. Dron najdaljši čas letenja doseže nekje pri 70 odstotkih največje hitrosti, zato je to privzeta vrednost v naši simulaciji.
- **Smer letenja:** Dron v naši simulaciji leti v ravni liniji ali krogu, kar je odvisno od trenutnega stanja. Med letenjem ves čas zaznava naprave IoT, omrežne dostope in sosednje drone, ki so v dosegu signala, ter z njimi izmenjuje pakete.
- **Višina letenja:** V sedanji različici simulacija deluje v poenostavljenem dvodimenzionalnem okolju, kar pomeni, da ne upošteva višine letenja in reliefa terena. Prav tako predpostavimo, da je implementirano izogibanje trkom, torej da dva drona ne moreta trčiti in da se dron ne bo zaletel v drevo ali drugo oviro (oziroma da ovire ne obstajajo).

Polnilne postaje so namenjene napajanju dronov, zato potrebujejo dostop do električnega omrežja ali pa se

napajajo tudi preko majhne solarne ali vetrne elektrarne. Lokacije postaj so zato fiksne, posledično pa so omejena tudi območja delovanja dronov. Ko dron prileti na polnilno postajo, se polni, dokler ni baterija polna. Čas polnjenja je odvisen od kapacitete baterije, hitrosti polnjenja in drugih dejavnikov. Čas polnjenja bi lahko skrajšali, če bi polnilno postajo robotizirali in bi ta dronu izpraznjeno baterijo preprosto zamenjala z drugo polno baterijo. Dron bi lahko odletel brez čakanja. Seveda bi za to potrebovali večje število baterij, ki bi se ves čas polnile, vendar bi tako lahko podprli tudi scenarije uporabe, ko mora dron leteti neprekinjeno. Polnilna postaja je lahko namenjena tudi večjemu številu dronov, v tem primeru mora imeti ustrezno večje število polnilnih mest. Dron ima namreč ob prihodu na polnilno postajo skoraj popolnoma prazno baterijo in ne more čakati na izpraznitev polnilnega mesta, saj za to nima več dovolj energije. V našem modelu vsakemu dronu pripada le ena postaja, model pa je možno enostavno razširiti tudi na primer, ko lahko postajo uporablja več dronov. V našem modelu lahko postajo z več polnilnimi mesti predstavimo tudi z večjim številom postaj za posamezne drone, ki so zelo blizu skupaj.

Omrežni dostop je mesto, kjer je omogočena povezljivost v internet. Predpostavljamo, da imamo na opazovanem področju, kjer so razporejene naprave IoT (npr. senzorji) in ki ga pokriva omrežje dronov, vsaj en omrežni dostop. Omrežni dostop predstavlja prehod, ki prenaša podatke iz odložljivega omrežja (torej iz omrežja dronov z občasno povezljivostjo med napravami IoT) v internet in nazaj. Omrežni dostop je torej fizična lokacija, kamor dron prinese pakete, ki so namenjeni prenosu v zunanje omrežje. Tipično je na tem mestu brezžična dostopna točka (npr. WiFi ali Bluetooth) s povezavo v podatkovno omrežje GSM ali satelitsko povezavo v internet, s katero se dron poveže, odda podatke, ki jih je prejel od senzorjev in drugih naprav IoT v svoji celici, in sprejme podatke, ki so namenjeni njemu ali drugim napravam v njegovi celici. Povezava je dvosmerna, podatki lahko potujejo iz zunanjega omrežja proti končni napravi IoT in nazaj. V našem simulacijskem okolju ima omrežni dostop enake lastnosti kot naprava IoT, le da ne generira podatkov.

Celica v omrežjih dronov rečemo območju, ki ga pokriva en dron. Področje, kjer so razporejene naprave IoT (npr. senzorji) in omrežni dostop(i) – lokacije z dostopom do omrežja (interneta), je razdeljeno na več celic, saj v splošnem en sam dron zaradi omejene avtonomije delovanja ne more pokrivati celotnega območja. Velikost celice je povezana z avtonomijo delovanja (največjim časom letenja oz. dometom) drona in je odvisna od količine energije, ki je shranjena v baterijah. Poleg tega je čas letenja odvisen tudi od hitrosti letenja, z večjo hitrostjo letenja se namreč čas letenja zmanjšuje. Čas in hitrost letenja skupaj določata domet drona oziroma razdaljo, ki jo lahko dron prepotuje z enim polnjenjem. Domet drona tako neposredno določa največjo možno velikost celice. Dron se lahko oddalji od polnilne postaje največ za polovico dometa, saj mora

imeti še dovolj energije za vrnitev na polnjenje. Smiselno je, da je celica precej manjša od največje možne velikosti, da lahko dron z enim polnjenjem preleti večji del celice. Celica ima obliko kroga, v središču katerega je polnilna postaja, in omejuje območje, ki ga pokriva posamezni dron. Naprave IoT in omrežni dostopi »pripadajo« posameznim dronom glede na to, v kateri celici se nahajajo. Celice se med seboj lahko prekrivajo, v tem primeru se naprave IoT ali omrežne dostope v preseku lahko dodeli vsem dronom, zadolženim za to območje. S primernim prekrivanjem celic lahko zagotovimo popolno pokritost območja z droni in tako dosežemo, da imajo vse naprave IoT vsaj občasen dostop do interneta. Za izmenjavo podatkov med sosednjima dronom zadošča, da sta drug drugemu v dosegu signala.

3.2 Model komunikacije

Za komunikacijo med dronom in napravo IoT ter med droni samimi se lahko uporabljajo različne brezžične komunikacijske tehnologije, kot so Bluetooth 5 (IEEE 802.15.1) ali Wi-Fi (različice IEEE 802.11a/b/g/n/ac). Na aplikacijski plasti se uporabljajo protokoli, kot so MQTT, MQTT-SN in CoAP. V aplikacijah interneta stvari najdemo tudi številne rešitve, ki omogočajo uporabo navedenih sporočilnih protokolov v odložljivih omrežjih [16]. Ker je naš model namenjen proučevanju usmerjanja, smo predpostavili idealno omrežje in nismo upoštevali motenj in ovir pri prenosu podatkov.

Naš cilj je z droni zagotoviti vsaj občasno komunikacijsko povezljivost napravam interneta stvari, ki so na območju brez komunikacijske infrastrukture. Dron uporabimo kot prehod za prenos podatkov med napravami IoT in do omrežja. Za pokrivanje večjega območja potrebujemo večje število dronov. Zaradi večjega števila dronov pa se pojavi potreba po regionalnem povezovanju dronov v omrežje dronov.

Droni tvorijo omrežje, ki služi za izmenjavo podatkov med posameznimi celicami. Ker droni med seboj niso v stalnem dometu komunikacije, je omrežje dronov odložljive narave (DTN). Za zagotovitev komunikacije v odložljivih omrežjih se uporabljajo protokoli, ki temeljijo na načelu shrani in posreduj. Paketi se na posameznem vozlišču (na izvoru ali na dronu) hranijo toliko časa, dokler ni omogočen prenos paketa naprej proti cilju. Tako se paketi postopno prenašajo med vozlišči omrežja, kar omogoča povezljivost kljub prekinitvam v povezanosti vozlišč.

Do komunikacije z drugim dronom, z napravo IoT ali omrežnim dostopom pride takoj, ko se druga naprava pojavi v dometu komunikacije. Dron pri tem odda in sprejme čakajoče pakete. V simulaciji ignoriramo uporabljeno komunikacijsko tehnologijo in aplikacijski protokol ter predpostavljamo, da se izmenjava zgodi v trenutku, ne glede na količino prenesenih podatkov, in da je vedno uspešna.

4 USMERJANJE

V tem razdelku opisujemo dve osnovni vrsti usmerjanja, opisujemo pa tudi način premikanja drona, saj je za

uspešno usmerjanje zelo pomemben. Usmerjanje v omrežju dronov pomeni pravila, ki določajo, kdaj in komu bo dron ob srečanju predal paket. Način premikanja pa določa, koga bo dron sploh srečal. Na obodu celice dron namreč srečuje predvsem sosednje drone, v notranjosti pa predvsem senzorje.

4.1 Epidemično usmerjanje

Epidemično usmerjanje (tudi poplavljanje) deluje po vzoru epidemije, kjer se bolezen razširi med vse osebe, ki pridejo v stik z okužbo [12].

Pri epidemičnem usmerjanju se paketi širijo po omrežju tako, da si vozlišča ob srečanju z vsakim sosedom izmenjajo vse pakete. Epidemično usmerjanje zagotavlja najmanjši povprečni čas dostave paketa med vsemi usmerjevalnimi protokoli, ki se uporabljajo v odložljivih omrežjih, zato služi kot osnova za primerjanje [18]. Dron torej prejeti paket (prej ali slej) posreduje vsem svojim sosedom.

Pri takem usmerjanju paket zagotovo pride do prejemnika po najhitrejši poti, vendar pa pride tudi po vseh drugih poteh, kar ni potrebno in močno obremenjuje omrežje. Za zagotovitev dostave paketov protokol izkorišča največ omrežnih virov med vsemi usmerjevalnimi protokoli, čeprav so viri še posebej na majhnih in manj zmogljivih napravah, kot so naprave IoT, zelo omejeni. V našem primeru sicer senzorji ne nastopajo kot vmesna vozlišča omrežja, temveč zgolj kot začetni pošiljatelji in končni prejemniki paketov, zato so njihovi pomnilniški viri zadovoljivi, podatke, ki jih zajamejo, morajo namreč hraniti le do prihoda drona. Omrežna vozlišča so v našem primeru droni, ki pa so prav tako omejeni z viri – količino pomnilnika – in tudi z energijo, saj so baterijsko napajani.

Slabost epidemičnega usmerjanja je torej, da morajo imeti vozlišča omrežja relativno velike količine pomnilnika za začasno hranjenje paketov. Poleg tega lahko pride do težave tudi pri izmenjavi paketov, saj mora dron ob srečanju drugemu dronu posredovati vse nove pakete, kar lahko v podatkovno intenzivnem sistemu traja dolgo časa in je tudi energijsko potratno, kar zadeva brezžično komunikacijo. To pomeni, da se lahko ob intenzivni komunikaciji baterija izprazni prej, kot je bilo pričakovano, s tem pa se nekoliko zmanjša tudi doseg drona.

V našem simulacijskem okolju oddaja in sprejem podatkov ne vplivata na praznjenje baterije dronov, saj se ne osredotočamo na energetske učinkovitost, ampak na usmerjevalne algoritme. V simulaciji se izmenjava podatkov izvrši v trenutku. Za zagotovitev delovanja epidemičnega usmerjanja in preprečevanje potovanja paketov v krogih smo v simulacijskem okolju določili še dodatna pravila za izmenjavo paketov, ki se uporabljajo tudi v nekaterih drugih realnih usmerjevalnih protokolih:

1. Dron preda paket vsakemu dronu zgolj enkrat, zato mora vedeti, komu je paket že predal, da mu ga ob naslednjem srečanju ne preda ponovno.
2. Dron sosednjemu dronu ne preda paketov, ki jih je ob prejšnjih srečanjih prejel od njega, zato mora

vedeti, od katerega sosednjega drona je prejel posamezni paket.

3. Dron ob prejemu paketa od drugega drona preveri, ali je ta paket že prej prejel od katerega drugega sosednjega drona. Če to drži, paket preprosto izbrši oziroma ignorira.

4.2 Usmerjanje ob prvem srečanju

Na področju odločljivih omrežij so se zaradi opisanih slabosti epidemičnega usmerjanja razvili številni drugi usmerjevalni protokoli, ki poskušajo omejiti poplavljanje paketov v omrežju. Pri usmerjanju ob prvem srečanju dron ne preda paketa vsem sosednjim dronom, temveč le prvemu, ki ga sreča. Ta usmerjevalni protokol ima sicer slabost, da ne zagotavlja, da bo paket dostavljen prejemniku, saj se lahko zgodi, da bo dron predal paket sosednjemu dronu, ki ne more več predati paketa v pravi smeri ali celo sploh nikamor, če je to končni dron omrežja in nima drugega sosedja. Podobna težava se pojavi, ko z omrežjem dronov pokrivamo področja nepravilnih oblik z dolgimi in ozkimi kraki. Predlagana ideja se sicer zgleduje po znanem načinu usmerjanja z naključnim sprehodom (angl. Random Walk Routing), ki se uporablja tudi v brezžičnih senzorskih omrežjih.

Vsekakor pa ta protokol lahko uporabimo tam, kjer toleriramo izgubo podatkov in kjer nam je pomembno, da podatek dobimo hitro ali pa ga sploh ne dobimo oz. nas ne zanima več. Uporaben je tudi v primeru, ko je pridobljenih podatkov sorazmerno veliko v primerjavi z zahtevanim obsegom, in zato ni potrebno, da vsi podatki pridejo do prejemnikov.

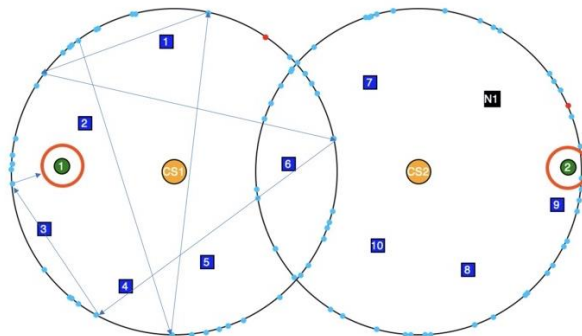
Senzor lahko na primer zajema podatke pogosteje, kakor jih potrebuje prejemnik, ali pa je število naprav IoT, ki zajemajo podatke na nekem območju, veliko in ni potrebno, da prejemnik pridobi podatke prav od vseh.

Usmerjanje ob prvem srečanju uporablja za izmenjavo paketov enaka pravila kakor epidemično usmerjanje, le da se prvo pravilo tu malce spremeni: dron preda paket zgolj enemu sosednjemu dronu, zato mora vedeti, ali je paket že komu predal.

4.3 Naključno premikanje

Pri naključnem premikanju dron leta med točkami na obodu celice, ki jih sproti naključno izbira tako, da ob prihodu na določeno točko takoj naključno izbere naslednjo točko na obodu. Ob tem med letenjem zaznava, če mu pridejo v doseg signala omrežni dostopi, naprave IoT in sosednji droni. Z vsako od teh naprav si takoj izmenjata pakete. Takšno premikanje je zadovoljivo, ko je območje pokrivanja majhno in pričakujemo, da dron z naključnim premikanjem slej ko prej najde vse naprave IoT in sreča dovolj sosednjih dronov, da je omogočen prenos paketov. Prav tako je to premikanje uporabno, kadar želimo na hitro pridobiti podatke z novega terena in nam pri tem morda ni bistveno, da dobimo vse podatke, temveč je dovolj, da dobimo le nekatere. Poleg tega se to premikanje lahko uporablja v okoljih, kjer se naprave IoT lahko premikajo.

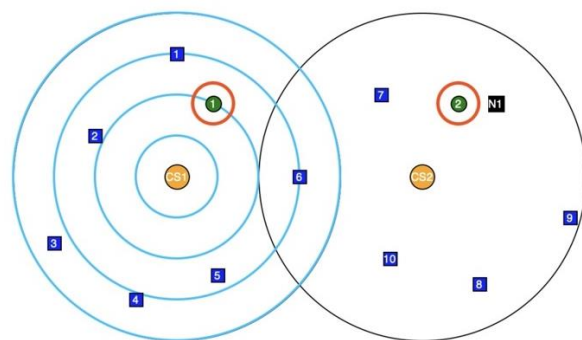
Slika 1 prikazuje dve celici, v katerih sta drona 1 in 2 (označena sta s krogom, okrog katerega obod označuje doseg signala). Na obodu so modro označene naključne točke, ki jih je dron obiskal v preteklosti, z rdečo pa je označena točka, proti kateri dron leti prav zdaj. CS1 in CS2 sta polnilni postaji, N1 je omrežni dostop, kvadratici s številkami pa so senzori. V celici drona 1 vidimo s puščicami označenih nekaj zadnjih korakov njegove poti in lahko razberemo, da je pred nedavnim obiskal senzorcje 3, 4 in 6. V preseku s celico drona 2 je morda srečal dron 2 in mu posredoval pakete, saj je v celici 2 omrežni dostop, v celici 1 pa ga ni.



Slika 1: Naključno premikanje drona.

4.4 Dvofazno premikanje

Za optimizacijo premikanja dronov v statičnih okoljih, kjer se naprave IoT (senzorji) ne premikajo, smo zasnovali dvofazno premikanje. Delovanje drona poteka v dveh fazah, to sta raziskovanje in usmerjanje.

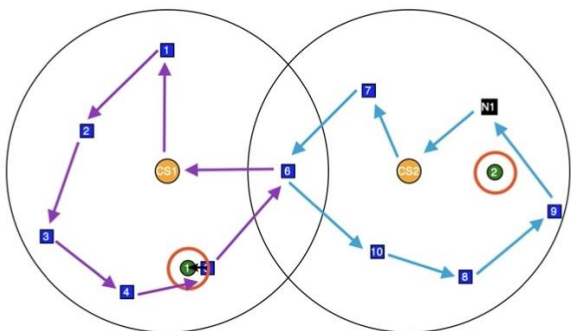


Slika 2: Sistematično raziskovanje celice v koncentričnih krogih.

1. FAZA: raziskovanje. Dron sistematično raziskuje celico v koncentričnih krogih od središča proti obodu, kot je prikazano na sliki 2. Dron odleti od polnilne postaje do prvega kroga, katerega radij je enak dvakratni vrednosti dosega signala drona. Ko naredi celoten obhod, se premakne za dvakratnik dosega signala navzven na naslednji krog in tako nadaljuje do oboda celice. Dron zagotovo najde vse naprave IoT in omrežne dostope v celici, z njimi izmenja pakete in si zapomni njihove lokacije. Nato dron išče sosednje drone tako, da leti po naključnih točkah na obodu celice kakor pri naključnem

premikanju, ki je prikazano na sliki 4.1. Dron zaključi z raziskovanjem sosednjih dronov šele, ko sreča dovolj sosednjih dronov ali pa se mora vrniti na polnilno postajo. Dron torej ne zaključi raziskovanja sosednjih dronov takoj, ko sreča enega sosedo, saj je cilj najti čim večje število sosedov. Pri dvofaznem premikanju si drona ob srečanju poleg paketov izmenjata tudi lokaciji središč celic.

2. FAZA: usmerjanje. V drugi fazi dron usmerja pakete. Najprej obiše vse naprave IoT in omrežne dostope v svoji celici, vendar njegovo premikanje ni več naključno, saj dron v tej fazi že pozna njihove lokacije in tako lahko določi dovolj dobro pot za obhod. Določitev obhodnega cikla predstavlja problem trgovskega potnika: dron je trgovski potnik, ki mora obiskati vse naprave IoT in omrežne dostope ter pri tem prepotovati čim krajšo pot. V drugem delu faze dron najprej določi točke srečanj s sosednjimi droni na podlagi lokacij središč njunih celic. Točka srečanja sosednjih dronov je na polovici razdalje med središčema njunih celic. Če se celici sosednjih dronov ne prekrivata in ne dotikata, pride do izmenjave paketov, kadar sta drona v dosegu signala drug drugega vsak v skrajni točki na obodu svoje celice. Dron po izračunu vseh točk srečanj določi obhodni cikel točk srečanj. Na vsaki točki nekaj časa čaka sosednji dron, nakar odleti naprej do naslednje točke. V simulacijskem okolju smo čas čakanja nastavili na eno minuto, vendar tudi daljši čas čakanja ne zagotavlja, da bo dron zagotovo srečal sosednjega.



Slika 3: Hamiltonova cikla, ki prikazujeta obhod po senzorjih in omrežnih dostopih v celicah 1 in 2.

Pri dvofaznem premikanju torej dron v prvi fazi raziskuje področje celice in v drugi fazi učinkovito srečuje naprave ter prevzema in oddaja pakete. Prvi del prve faze se izvede samo enkrat in nato nikoli več, razen v primeru dodajanja novih naprav ali občasne spremembe lokacij obstoječih naprav. Drugi del prve faze se poleg uvodnega raziskovanja ponavlja vsake štiri cikle, torej dron tri cikle obiskuje točke srečanj s sosednjimi droni, nakar naslednji cikel ponovi naključno premikanje med mejnimi točkami celice, da tako poveča možnost srečanja novega sosedo. V prvem uvodnem raziskovanju je namreč lahko srečal zgolj enega sosedo,

vendar so okrog lahko še drugi, ki jih sicer ne bi našel, ali pa je bil medtem na območje dodan kak nov dron.

Dodatno lahko dron v vseh fazah ob spontanem srečanju sosedo z njim izmenja pakete in lokaciji središč celic, če sta se srečala prvič. Če sta se srečala že kdaj prej, dron odstrani sosedo iz naslednjega obhodnega cikla točk srečanj, saj mu je že predal vse pakete. Če so lokacije naprav IoT in omrežnih dostopov znane že vnaprej, jih lahko dronu tudi vnaprej nastavimo ter nato izpustimo sistematično raziskovanje celice v krogih. Prav tako so lahko poznane lokacije središč sosednjih celic, v tem primeru se lahko izpustijo raziskovanja sosednjih dronov.

5 ROBNI POGOJI SIMULACIJ

V sklopu raziskave smo implementirali simulacijsko okolje, imenovano Drone DTN Simulator, ki podpira določanje položaja polnilnih postaj in s tem lociranje celic, določanje lastnosti dronov (čas polnjenja, največja hitrost letenja, najdaljši čas letenja, najdaljši doseg letenja, čas polnjenja baterije, doseg signala drona, radij celice), gibanje dronov po svojih celicah, določanje položaja omrežnih dostopov, določanje položaja naprav IoT (senzorjev), določanje intenzivnosti generiranja podatkov na napravah IoT, izbiro opisanih dveh načinov usmerjanja, sledenje paketom po omrežju in preprosto analitiko prenosov. Med izvajanjem lahko simulacijo spremljamo v preprostem grafičnem vmesniku. V privzetih nastavitvah na zaslonu vidimo območje, ki ustreza približno 25 x 25 km, merilo pa lahko tudi spremenimo.

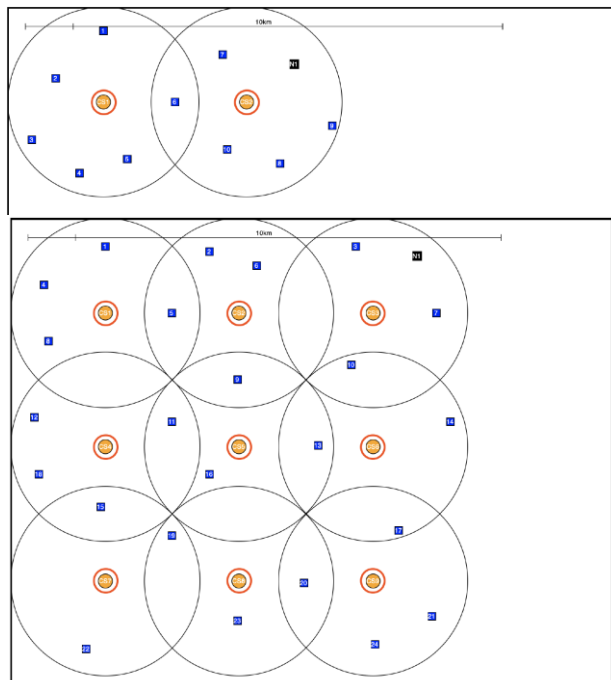
Podatki za vsako simulacijo obsegajo tri tabele:

Tabela naprav IoT hrani za vsako napravo njeno oznako, lokacijo, seznam dodeljenih dronov, interval kreiranja paketov, seznam prejetih paketov in seznam paketov, ki čakajo na prevzem.

Tabela omrežnih dostopov hrani za vsak omrežni dostop oznako, lokacijo, seznam dodeljenih dronov in seznam prejetih paketov.

Tabela dronov hrani podatke o dronih, in sicer oznako, lokacijo, vrednost baterije, seznam paketov, seznam starih paketov, oznako celice, seznam pripadajočih polnilnih postaj, seznam in obhodni cikel naprav IoT in omrežnih dostopov, seznam sosednjih dronov, obhodni cikel točk srečanja s sosednjimi droni, čas raziskovanja, čas usmerjanja, čas polnjenja, največjo hitrost letenja, najdaljši čas letenja, najdaljši doseg letenja, čas polnjenja baterije, doseg signala drona in radij celice.

Simulacije smo izvajali na dveh postavitvah, prva je zajemala dve celici, 10 naprav IoT in en omrežni dostop. Druga postavitvev ima 9 celic, postavljenih v kvadrat 3 x 3 celice, 24 naprav IoT in en omrežni dostop. Razpored celic za obe postavitvi prikazuje slika 4.



Slika 4: Postavitve z 2 celicama (zgoraj) in z 9 celicama (spodaj).

Vsaka celica ima enega drona, v središču je polnilna postaja, v celicah pa je različno število naključno razporejenih naprav IoT. Te se lahko nahajajo tudi v presekih celic, torej v dveh celicah, in jih lahko oskrbujeta oba pripadajoča drona.

Robni pogoji simulacij so bili pri obeh postavitvah naslednji: naprave IoT kreirajo en podatkovni paket vsakih 8 ur. Privzete nastavitve dronov: največja hitrost letenja 70 km/h, najdaljši čas letenja 30 minut, čas polnjenja 60 minut, doseg signala 140 in 250 metrov in radij celice 2 kilometra. Navedeni podatki so realni za manjše komercialno dostopne civilne drone, medtem ko imajo veliki droni, droni za vojaško uporabo in podvodni droni lahko drugačne karakteristike. Najdaljši doseg letenja drona se za potrebe simulacije izračuna kot produkt 70 % največje hitrosti in najdaljšega časa letenja in pri zgornjih nastavitvah znaša 24,5 km.

V simulaciji smo predpostavili, da dronom položaji naprav IoT in omrežnih dostopov ter položaji točk srečanj s sosednjimi droni niso znani. Na obeh postavitvah smo simulirali vsako kombinacijo načina premikanja dronov in načina usmerjanja paketov. Simulirali smo torej naključno in dvofazno premikanje dronov v primeru epidemičnega usmerjanja in obe vrsti premikanja v primeru usmerjanja ob prvem srečanju. Pri tem smo za vsako kombinacijo pognali pet ponovitev simulacije. Simulirani čas smo omejili na 72 ur, nato smo simulacijo prekinili, tudi če vsi paketi še niso bili dostavljeni.

Vse navedene simulacije smo pognali dvakrat, in sicer enkrat z dosegom signala drona 250 m (predpostavka, da dron uporablja komunikacijo po IEEE 802.11n) in drugič

z dosegom signala 140 m (dron uporablja komunikacijo IEEE 802.11b ali g).

6 REZULTATI IN DISKUSIJA

V postavitvi z dvema celicama se vsak paket prenese bodisi od naprave IoT preko matičnega drona neposredno na omrežni dostop (2 skoka po omrežju) ali pa vmes še z matičnega drona na sosednji dron in od tu na omrežni dostop (3 skoki po omrežju). Tabela 1 prikazuje čase trajanja simulacij, povprečne čase raziskovanja, polnjenja in usmerjanja dronov, odstotek uspešno dostavljenih paketov in čase do dostave paketa na omrežni dostop. Vse vrednosti v tabeli predstavljajo povprečja petih simulacij z enakimi robnimi pogoji.

Opazimo, da dron kar okrog dve tretjini časa preživi na polnilni postaji. V simulaciji vsakič ustvarimo 90 podatkovnih paketov, naknadno se v času simulacije ustvari še nad 50 kopij. Odstotek dostavljenih paketov je pri epidemičnem usmerjanju ne glede na doseg signala drona višji kot pri usmerjanju ob prvem srečanju, kar je pričakovano. Prav tako je ne glede na vrsto usmerjanja odstotek dostavljenih paketov višji pri dvofaznem premikanju kot pri naključnem premikanju. V nobeni simulaciji se ne dostavijo vsi paketi, predvsem ker se včasih drona preprosto ne srečata. Čas simulacije je ne glede na preostale parametre nižji pri dvofaznem premikanju dronov kot pri naključnem premikanju. Pri dvofaznem usmerjanju dron približno polovico časa letenja raziskuje – torej išče stik z drugim dronom. Pri manjšem dosegu signala je odstotek nedostavljenih paketov pričakovano višji.

Povprečen čas trajanja do dostave paketa je pri dosegu signala drona 140 m opazno daljši kot pri dosegu 250 m, velikost razlike pa med simulacijami niha.

Tabela 3: Povprečni čas, potreben za en skok paketa, za obe postavitvi (2 drona in 9 dronov), ločeno za dostavljene in nedostavljene pakete.

Usm.	Pr.	Povpr. čas skoka (2 drona)		Povpr. čas skoka (9 dronov)	
		Dost.	Nedost.	Dost.	Nedost.
Doseg signala drona 250 m					
E	N	1:59:37	1:19:54	2:13:33	2:22:37
E	D	1:28:05	1:29:47	2:10:06	2:09:59
P	N	2:29:37	1:28:29	1:50:36	1:59:09
P	D	1:14:39	0:59:10	1:34:14	1:42:49
Doseg signala drona 140 m					
E	N	3:48:00	2:52:25	4:17:47	4:37:34
E	D	2:44:11	3:02:18	2:21:00	3:11:49
P	N	3:59:24	2:38:31	3:13:16	3:13:49
P	D	1:39:05	1:08:07	2:02:59	2:32:41

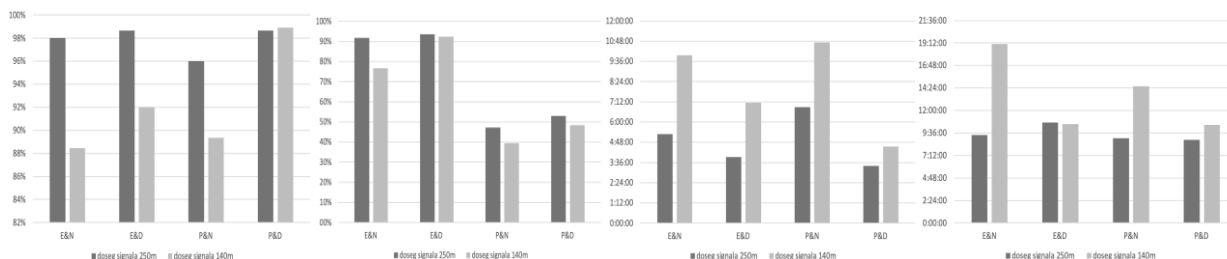
Kot lahko vidimo v tabeli 2, so za postavitve z 9 celicami časi simulacij vedno enaki, 72 ur, kar pomeni, da se je simulacija vedno zaključila zaradi poteka časa, in ne zaradi dostave vseh paketov. Graf na sliki 5 nazorno kaže

Tabela 1. Postavitev z dvema celicama: čas simulacije, povprečni časi posameznih faz drona, število kreiranih, dostavljenih in kopiranih paketov, odstotek dostavljenih paketov in časi do dostave paketa na omrežni dostop.

Usm.	Pr.	Dron – povprečni čas			Število paketov			% dost. paketov	Čas simulacije	Trajanje dostave paketa [s]				
		Razisk.	Usmer.	Poln.	Kreir.	kopij	Dost.			Min.	Maks.	Povpr.	Mediana	Std. dev.
Doseg signala drona 250 m														
E	N	-	22:23:12	48:21:22	90	55	88	98,0	70:44:35	0:18:21	18:46:44	5:16:24	4:12:09	4:05:27
E	D	10:37:56	11:16:36	46:59:38	90	53	89	98,7	68:54:10	0:05:56	12:45:01	3:54:49	1:55:35	4:03:37
P	N	-	22:26:28	48:34:42	90	51	86	96,0	71:01:10	0:09:52	22:39:41	6:52:27	4:52:21	5:49:53
P	D	9:59:41	11:33:36	46:12:30	90	55	89	89,0	67:45:48	0:04:27	14:22:53	3:23:26	1:46:59	3:40:33
Doseg signala drona 140 m														
E	N	-	22:43:57	49:16:03	90	49	80	80,0	72:00:00	0:22:07	30:55:17	9:57:23	7:15:46	7:28:26
E	D	11:38:02	10:58:55	48:35:44	90	44	83	83,0	71:12:41	0:07:19	25:27:52	7:09:03	3:44:27	7:55:02
P	N	-	22:44:31	49:15:29	90	49	80	80,0	72:00:00	0:33:10	32:08:07	10:43:19	8:01:55	8:31:34
P	D	9:28:48	12:10:42	46:19:16	90	53	89	89,0	67:58:45	0:13:56	22:38:58	4:32:51	1:52:15	5:57:23

Tabela 2: Postavitev z devetimi celicama: čas simulacije, povprečni časi posameznih faz drona, število kreiranih, dostavljenih in kopiranih paketov, odstotek dostavljenih paketov in časi trajanja dostave paketov na omrežni dostop.

Usm.	Pr.	Dron – povprečni čas			Število paketov			% dost. paketov	Čas simulacije	Trajanje dostave paketa [s]				
		Razisk.	Usmer.	Poln.	Kreir.	kopij	Dost.			Min.	Maks.	Povpr.	Mediana	Std. dev.
Doseg signala drona 250 m														
E	N	-	22:44:40	49:15:20	216	1510	198	91,7	72:00:00	0:19:15	26:04:04	9:23:10	8:10:15	5:37:43
E	D	7:46:20	15:06:15	49:07:25	216	1496	202	93,4	72:00:00	0:03:35	30:40:29	10:43:38	9:01:37	8:01:45
P	N	-	22:44:12	49:15:48	216	718	102	47,1	72:00:00	0:19:11	28:19:53	9:01:09	7:24:02	7:11:18
P	D	7:46:20	15:10:02	49:06:51	216	757	114	52,9	72:00:00	0:04:16	31:58:12	8:52:06	6:06:30	8:33:09
Doseg signala drona 140 m														
E	N	-	22:43:40	49:16:20	216	1336	166	76,7	72:00:00	0:43:15	44:57:17	19:05:34	17:16:57	11:21:25
E	D	7:50:30	15:02:21	49:07:09	216	1370	190	92,3	72:00:00	0:07:00	34:12:48	10:32:21	8:42:05	8:36:48
P	N	-	22:43:45	49:16:15	216	644	85	39,4	72:00:00	0:34:50	49:36:37	14:34:27	10:38:42	11:45:41
P	D	8:05:44	14:46:11	49:08:05	216	614	104	48,3	72:00:00	0:06:47	43:05:31	10:27:29	5:03:37	11:16:33



Slika 5: Leva dva grafa: Odstotek dostavljenih paketov, levo pri postavitvi z 2 dronomi, desno pri postavitvi z 9 droni. Desna dva grafa: Povprečno trajanje dostave paketov, levo pri postavitvi z 2 dronomi, desno pri postavitvi z 9 droni. Temnejši stolpec predstavlja doseg signala 250 m, svetlejši pa 140 m.

znatno manjši odstotek dostavljenih paketov v primeru te postavitve in usmerjanja ob prvem srečanju. Vzrok je, da paket lahko pride do drona, ki ne more več predati paketa nobenemu sosedu in s tem se njegova pot zaključi. Epidemično usmerjanje pa zagotavlja višji odstotek dostavljenih paketov. Pri spremembi dosega signala z 250 na 140 metrov je razlika v primeru naključnega premikanja večja, v dvofaznem premikanju pa manjša. Droni potrebujejo le nekaj več časa za začetno odkrivanje, ob vzpostavljenem omrežju pa točke srečanja zagotavljajo zanesljivo predajo paketov.

Ker dron pri usmerjanju ob prvem srečanju ne pošilja kopij paketov vsem sosedom, je tu število kopij manjše kot pri epidemičnem usmerjanju, žal pa je nižji tudi

odstotek dostavljenih paketov. Zato se to usmerjanje lahko uporablja v aplikacijah, kjer toleriramo izgube podatkov. Pozitivno je, da kreira občutno manj kopij paketov, skoraj za polovico. Droni bi bili manj pomnilniško obremenjeni, kar bi prispevalo tudi k hitrejši izmenjavi paketov ob srečanju.

Povprečni časi posameznih faz drona (raziskovanje, usmerjanje in polnjenje) kažejo, da ne glede na način usmerjanja in premikanja polnjenje drona predstavlja največji delež časa. Razlike pa so pri deležih časov raziskovanja in usmerjanja. Čas usmerjanja je pri postavitvi z 9 droni občutno večji od časa raziskovanja, lahko rečemo skoraj za polovico. Razlog za to se skriva v tem, da ima vsak dron tri sosede, sredinski dron pa celo

osem. Poleg tega zaradi večjega števila sosednjih celic prihaja do njihovega večjega prekrivanja in je verjetnost srečanja dovolj velika.

Kar zadeva čas trajanja do dostave paketov, ugotavljamo, da naključno premikanje dronov v kombinaciji z epidemičnim usmerjanjem pri dosegu signala 250 metrov zagotavlja najmanjši standardni odklon. Razlog za to se najverjetneje skriva v tem, da so celice relativno majhne v primerjavi z dosegom signala in prekrivanja celic velika, zato se sosednji droni z naključnim premikanjem z veliko verjetnostjo srečajo. Pri dvofaznem premikanju droni čakajo soseda na točkah srečanja, a se v primeru večjega števila sosedov izkaže, da dron tako soseda pogosto vendarle ne sreča.

Opazimo lahko tudi, da se pri uporabi naključnega premikanja z manjšim dosegom signala verjetnost srečanja občutno zmanjša, podaljšajo pa se povprečni časi posameznih skokov.

Povprečne čase skoka paketov prikazuje tabela 3. Ob uporabi dvofaznega premikanja je ta čas manjši kot ob uporabi naključnega premikanja v primeru uporabe enakega usmerjevalnega protokola. Razlika je še zlasti opazna pri dosegu signala 140 metrov, kjer paketi naredijo skok pri dvofaznem premikanju kar minuto hitreje kot pri naključnem premikanju. Paket v povprečju naredi skok hitreje v primeru usmerjanja ob prvem srečanju kot naključnega premikanja, kar je verjetno posledica tega, da je število kopij paketov v omrežju v prvem primeru manjše.

7 ZAKLJUČEK

V tem delu smo se posvetili raziskovanju implementacije principov odložljivih omrežij v omrežjih dronov. Identificirali smo težave, ki se pojavijo pri usmerjanju paketov ob uporabi dronov in predlagali model sistema, kjer droni omogočajo povezljivost napravam IoT. Predlagali smo dva temeljna načina usmerjanja paketov in dva načina premikanja dronov. Za dokaz ustreznosti postavljenega modela smo zasnovali simulacijsko okolje, ki nam je omogočalo testiranje predlaganih načinov premikanja dronov in načinov usmerjanja paketov.

Na podlagi testiranja smo zaključili, da se v statičnih okoljih bolje izkaže dvofazno premikanje. Za usmerjanje paketov se je bolje izkazalo epidemično usmerjanje, vendar je njegova slabost potencialna preobremenitev omrežja. Zato je v določenih aplikacijah bolje uporabiti usmerjanje ob prvem srečanju, če le lahko toleriramo izgubljanje podatkov.

Rezultati lahko služijo nadaljnjemu raziskovanju tega področja, omogočajo vključevanje novih usmerjevalnih protokolov in načinov premikanja dronov ter primerjavo s predlaganimi osnovnima. Naše simulacijsko okolje je uporabno za vizualizacijo sistema in delovanja dronov. Nadgraditi bi ga bilo mogoče tako, da bi podpiralo tudi premikanje senzorjev, kar bi omogočilo simulacijo dodatnih modelov omrežja in scenarijev uporabe (na primer sledenje divjadi). Model bi tudi lahko bolj

približali realnim razmeram, na primer z upoštevanjem 3D-modela terena, ovir in motenj signala.

Pri predlaganih osnovnih usmerjevalnih protokolih bi lahko izboljšali učinkovitost tako, da bi protokol upošteval lokacije naprav IoT in dron ne bi predajal paketov sosednjim dronom, če so namenjeni napravam znotraj njegove celice. Dvofazno premikanje bi bilo mogoče izboljšati tako, da bi sosednja drona poleg lokacije uskladila tudi čas naslednjega srečanja, kar pa pomeni izziv v primeru večjega števila sosednjih dronov in usklajevanja časov polnjenja. Zanimivo bi bilo testirati tudi način pokrivanja celice s pomočjo dveh dronov, eden bi lahko služil nenehnemu zbiranju podatkov z naprav IoT, drugi pa bi se nahajal ob meji celice ter zagotavljal predačo paketov med sosednjimi droni; med seboj bi se seveda morala usklajevati.

Možnosti za nadaljnje raziskave je še veliko in prepričani smo, da bomo s hitro rastjo področja interneta stvari razvili tudi nove usmerjevalne protokole in kompleksnejše modele sistemov z droni za zagotavljanje povezljivosti.

LITERATURA

- [1] S. Toumpis, Towards efficient drone networking (2017). <https://dronehub.tk/towards-efficient-drone-networking/a88d67771878>
- [2] M. A. Khan, I. M. Qureshi, F. Khanzada, A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad-hoc network (fanet), *Drones* 3 (1) (2019) 16. doi:10.3390/drones3010016.
- [3] A. Guillen-Perez, R. Sanchez-Iborra, J. C. Sanchez-Aarnoutse, M.D.Cano, J. Garcia-Haro, WiFi networks on drones, in: 2016 ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT), 2016, pp. 183-190. doi:10.1109/ITU-WT.2016.7805730.
- [4] J. J. C. Rodrigues, Advances in Delay-tolerant Networks (DTNs): Architecture and Enhanced Performance, no. 67 in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Woodhead Publishing, 2015.
- [5] N. Uchida, N. Kawamura, T. Ishida, Y. Shibata, Resilient network without autonomous ight wireless nodes based on delay tolerant networks, *ITCoNvergence PRactice (INPRA)* 2 (3) (2014) 1-13.
- [6] C. Giannini, A. A. Shaaban, C. Buratti, R. Verdonesi, Delay tolerant networking for smart city through drones, in: 2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2016, pp. 603-607. doi:10.1109/ISWCS.2016.7600975.
- [7] M. Bae, S. Yoo, J. Jung, S. Park, K. Kim, J. Y. Lee, H. Kim, Devising mobile sensing and actuation infrastructure with drones, *Sensors* 18 (2)(2018) 624.
- [8] W. Chen, J. Liu, H. Guo and N. Kato, "Toward Robust and Intelligent Drone Swarm: Challenges and Future Directions," in *IEEE Network*, vol. 34, no. 4, pp. 278-283, July/August 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900521.
- [9] S. Babu, G. Jain, B. S. Manoj, Urban delay tolerant network simulator (udtnsim v0.1), *ArXiv abs/1709.05645*.
- [10] D. Moura, L. Guardalben, M. Luis and S. Sargento, "A Drone-Quality Delay Tolerant Routing Approach for Aquatic Drones Scenarios," 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269070.
- [11] Poikonen, Stefan, and James F. Campbell. "Future directions in drone routing research." *Networks* 77.1 (2021): 116-126.
- [12] Vahdat, A., & Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report CS-200006, Duke University, Durham.
- [13] O. M. Bushnaq, A. Chaaban and T. Y. Al-Naffouri, "The Role of UAV-IoT Networks in Future Wildfire Detection," in *IEEE*

- Internet of Things Journal, vol. 8, no. 23, pp. 16984-16999, 1 Dec.1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3077593.
- [14]N. Nitin, Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, coap, amqp and http, in: 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), 2017, pp. 1. doi:10.1109/SysEng.2017.8088251.
- [15]J. Luzuriaga, M. Zennaro, J. C. Cano, C. Calafate, P. Manzoni, A disruption tolerant architecture based on MQTT for IoT applications, in: 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), 2017, pp. 71-76, doi:10.1109/CCNC.2017.7983084.
- [16]K.-S. Wong, T. C. Wan, Current state of multicast routing protocols for disruption tolerant networks: Survey and open issues, Electronics 8 (2) (2019), pp 162. doi:10.3390/electronics8020162.
- [17]A. Guillen-Perez, M. D. Cano, Flying ad hoc networks: A new domain for network communications, Sensors 18 (10) (2018) 3571. doi:10.3390/s18103571.
- [18]T. Spyropoulos, R. N. B. Rais, T. Turletti, K. Obraczka, A. Vasilakos (2010). Routing for disruption tolerant networks: taxonomy and design. Wireless networks, 16(8), 2349-2370.

Štefan Klemenčič je diplomiral in magistriral na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo komunikacijske tehnologije in tehnologije interneta stvari. Zaposlen je v Aviat Networks, kjer kot razvojni inženir sodeluje pri razvoju programske opreme za produkte s področja brezžičnega transporta.

Mojca Ciglarič je diplomirala, magistrirala in doktorirala na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani, kjer je tudi zaposlena. Je vodja Laboratorija za računalniške komunikacije in dekanja FRI. Njena raziskovalna zanimanja vključujejo komunikacijske protokole, porazdeljene sisteme in infrastrukture ter varnost.