

**ПРИМЕНА БЕСПИЛОТНИХ ЛЕТЕЛИЦА ОПРЕМЉЕНИХ ЛИДАРОМ ЗА СНИМАЊЕ
НАДЗЕМНИХ ПРОВОДНИКА У ЕЛЕКТРОДИСТРИБУТИВНИМ ИЛИ ПРЕНОСНИМ
МРЕЖАМА**

**APPLICATION OF LIDAR EQUIPPED UAVS FOR SURVES OF OVERHEAD LINES IN ELECTRIC
DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS**

Љубиша АЦЕМОВИЋ, Livona d.o.o., Србија

Иван СОСКИЋ, Livona d.o.o., Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

Примена лидар технологије из ваздуха за снимање надземне електродистрибутивне и преносне мреже није новост и на делу је већ годинама. Типичне примене су снимање дугих коридора из авиона или хеликоптера, којима се добијају прецизни подаци десетина километара траса у кратком периоду. Међутим, примена ових система за снимање краћих деоница, посебно у урбаном простору или код праћења изградње инфраструктурних објеката, често није могућа, економски је неисплатива или је компликована у смислу добијања адекватних дозвола за лет изнад одређених подручја. Беспилотне летелице опремљене лидаром постале су мање, практичније, економски доступне и могу се користити било где и било кад, све то уз задовољавајућу позициону тачност. Од момента одлуке до момента лансирања и снимања, протиче веома кратко време, тако да се беспилотне летелице са лидаром могу користити у редовном одржавању мреже за брзо и прецизно снимање специфичних ситуација на терену. Овим радом приказује се неколико примера таквих снимања са посебним освртом на теренске процедуре рада, укључујући припрему опреме, планирање лета, параметре снимања и њихову реализацију, закључно са приказом резултата и интерактивним анализама у разним софтверима.

Кључне речи: Лидар, беспилотне летелице, надземна мрежа, надземни проводници

ABSTRACT

The application of airborne lidar technology for surveying of overhead lines of electric distribution and transmission networks is not new and has been in operation for years. Typical applications are surveying of long corridors using standard airplanes or helicopters, which provides precise data for tens of kilometres of routes in a short period of time. However, the application of these systems for recording shorter sections, especially in urban areas or when monitoring construction of infrastructure projects, is often not possible, is economically unprofitable or is complicated in terms of obtaining adequate permits to fly over certain areas. Unmanned aerial vehicles equipped with lidar sensors have become smaller, more practical, economically available and can be used anywhere and anytime, all with satisfactory positional accuracy. From the moment of decision to the moment of launch and survey, a very short time passes, so drones with lidar can be used in regular maintenance of the network for quick and accurate surveys of specific field situations. This paper presents several examples of such surveys with special reference to field work procedures, including equipment preparation, flight planning, flight parameters and surveying, concluding with the display of results and interactive analysis in various software.

Key words: Lidar, UAV, overhead network, overhead lines

1. УВОД

Примена лидера за анализу стања надземних електроенергетских мрежа одавно је потврђена у пракси и њене користи није је потребно доказивати. Новост је појава малих лидера умерене цене, прилагођених беспилотним летелицама опште намене. Раније веома скупа и компликована технологија, постала је економски приступачна и практична, при том задовољавајућег квалитета.

Досадашња примена лидера у енергетици подразумевала је коришћење скувих и гломазних система великог капацитета, инсталираних на мале авионе и хеликоптере. Ти системи показали су се савршено рационалним и оправданим за снимања дугих коридора, дугачких више десетина или чак стотина километара, посебно оних који се протежу дуж непроходних и недоступних предела.

Њихова примена у пракси отежана је управо том величином и капацитетом, односно потребом за великим летелицама које могу да понесу крупну и тешку опрему. Те су летелице намењене широким отвореним просторима и дугим међуградским коридорима, али нису погодне за снимање локација мале површине или кратких коридора надземне мреже, посебно оних унутар насеља. Крајње је нерационално подизати велики авион или хеликоптер за снимање појединачних ЕЕ објеката, пар километара трасе или праћење развоја инвестиционих пројеката.

Насупрот томе мале беспилотне летелице веома су погодне за снимање појединачних локација, мањих површина и краћих траса, једнако у насељу или ван њега. Практичне и ефикасне, високог степена аутоматизације, погодне су за снимање и анализу стања производних и дистрибутивних ЕЕ објеката и њихове околине, укључујући површинске копове, електране, трансформаторске станице на отвореном, а нарочито за анализу угиба надземних проводника и праћење разних промена на траси (нова укрштања, приближавања, подграђивања, насипања, ископавања, изградња, ...).



Слика 1 - Дрон са монтираним лидаром на полетно-слетном месту (Извор: Љ.Аџемовић, 2024)

2. ЗАДАТАК И ЦИЉЕВИ

Овај рад посвећен је примени лидара у поступцима одржавања надземних водова и то за документовање и анализу тренутног положаја проводника у односу на околне природне и вештачке објекте.

Применом лидара потребно је урадити следеће задатке:

- Установити позицију надземних проводника у простору.
- Анализирати њихов положај у односу околне објекте.

Конкретан циљ је утврђивање оптималних параметара за реализацију постављених задатака, како би се омогућило боље планирање, ефикаснија реализација теренских радова и добијање квалитетних крајњих резултата.

3. ЛИДАР

3.1 Мерење лидаром

Лидар припада оним мерним уређајима намењеним мерењу растојања до циљног предмета, слично сонару и радару. Док сонар и радар удаљеност одређују на основу звучних и радио таласа, лидар користи светло, односно ласерски зрак.

За одређивање прецизних координата циља, поред удаљености до њега потребно је знати просторни положај почетне мерне тачке, као и оријентацију ка циљу. Те податке обезбеђују ГНСС уређај и инерцијални систем. Те три компоненте – лидар, ГНСС и ИС – основа су сваког лидар мерног система, независно од његове величине и цене.

Лидари емитују више стотина хиљада ласерских импулса у секунди и региструју један или више одбитака. Резултат мерења су координате милиона тачака које детаљно дефинишу објекат снимања и приказују га у форми ”облака тачака” (point cloud).

Захваљујући вишеструком одбитку ласерског зрака, на истој локацији могуће је измерити више тачака, укључујући врх опажаног објекта (нпр. проводник) као и тачке у околини или непосредно испод објекта (нпр. крошње дрвећа или тло).

Даљом обрадом података могуће је извршити класификацију тачака према разним критеријумима, на пример издвојити тачке различите висине (проводници, висока и ниска вегетација, тло), раздвојити природне и вештачке објекте (вегетација, путеви, стубови, проводници, ...) или генерисати друге изведене резултате (подужне профиле, 3Д моделе објеката и терена, изохипсе, итд).

Вишеструко одбијање нарочито је важно за надземне водове који се протежу кроз високу вегетацију, јер омогућују прецизно одређивање положаја проводника чак и кад је делимично заклоњен вегетацијом. Због тога је број одбитака важан параметар при избору лидара и пожељни су системи са већим бројем одбитака.

3.2. Коришћени лидари

Лидар снимање извршено је са два професионална система за геодетски премер, прве и друге генерације. Коришћени су различити модели због провере значаја појединих техничких спецификација и њиховог утицај на резултате.

Оба модела са успехом могу да се користе за премер ЕЕ објеката. Сасвим очекивано, модел друге генерације омогућује боље резултате, прецизније податке са веће висине и при бржем лету, већи број мерних тачака, више одбитака, поузданије одређивање тла под вегетацијом.

Табела 1 даје упоредни приказ важних спецификација.

Табела 1 - Упоредни преглед техничких спецификација дронева

Дрон:	DJI Matrice 300 RTK	DJI Matrice 350 RTK
Лидар:	Zenmuse L1	DJI Zenmuse L2
Максимални број одбитака ласерског сигнала	3	5
Максимални број тачака у секунди:	240.000 / 480.000 (један / више одбитака)	240.000 / 1.200.000 (један / више одбитака)
Тачност мерења дужине	3 cm @100 m	2 cm @150 m
Тачност (1σ):	Хоризонтално: 10 cm@50 m Вертикално: 5 cm@50 m	Хоризонтално: 5 cm@150 m Вертикално: 4 cm@150 m
Домет	450 m @ 80% рефлект. @ 0 klx 190 m @ 10% рефлект. @ 100 klx	450m @50% рефлект. @ 0 klx 250m @10% рефлект. @ 100 klx

4. ОПШТА ПРОЦЕДУРА РАДА

Комплетна процедура рада укључује три целине:

1. Планирање
2. Лидар премер
3. Обрада података и анализе.

4.1. Планирање

Планирањем се дефинишу област премера и параметри рада. Планирање снимања изводи се у теренском софтверу који се типично испоручује уз лидар. Постоје и независни софтвери који подржавају лидаре различитих произвођача.

Област премера може се задати се као површина (затворени полигон) или коридор (линија). Није могуће комбиновати површине и коридоре у једној сесији премера, већ се морају планирати посебне сесије.

За премер трансформаторске станице и њене околине дефинише се полигон који окружује станицу и ширу област од интереса (управна зграда, поља трансформаторске станице, улазно-излазни портали, интерни и приступни путеви, суседни објекти, ...).

За даљи премер надземног вода дефинише се коридор жељене ширине који обухвата трасу вода и непосредну околину. Зависно од дужине вода и ширине појаса дуж вода, мерење коридора може захтевати више посебних сесија премера.

4.1.1. Коридори. У зависности од ширине коридора, потребан је један или више прелета дуж коридора. Иако је коридор могуће премерити у једном прелету, само у једном правцу лета, резултати таквог премера могу имати пропуста због евентуално заклоњених тачака или погледа на проводник само из једног угла. Поновљеним прелетима у једном и другом правцу дуж коридора обезбеђује се боља покривеност простора, већи број мерених тачака, боља дефиниција проводника, поузданија класификација и квалитетнија обрада података у општем смислу.

За широке коридоре који обухватају више надземних водова, који се паралелно пружају до тачке раздвајања на посебне правце, може бити потребно више прелета како би оба вода била коректно снимљена (нпр. прелет изнад оба вода и прелет изнад централне линије коридора између водова).

4.1.2. Параметри. Кључни параметри премера су висина и брзина лета.

Ниже висине и брзине обезбеђују већу прецизност мерења, већу густину тачака по јединици површине, детаљнију покривеност простора и већи број мерених тачака, али уз спорији рад и мању дневну продуктивност.

Повећање висине поред ниже тачности резултира и већим растурањем тачака, односно мањој густини и броју тачака на објекту. Код снимања површинских објеката то не мора бити проблем, али у случају надземних проводника малог пречника, проводник можда неће бити видљив или ће имати недовољан број тачака за касније анализе. Чест је случај да облак тачака садржи проводнике, али је заштитно уже невидљиво или има тек понеку тачку.

Повећање брзине лета неминовно води ка мањем броју тачака на објекту. У случају надземних проводника могућ је повећан размак између суседних тачака, неуједначен број тачака, чак и местимични прекиди проводника, дужи или краћи. Све то може отежати даљу обраду података, поуздану класификацију и векторизацију проводника, онемогућити аутоматске процедуре и налагати дужи и тежи ручни рад.

Због наведених проблема веома је важно одредити оптималне параметре за премоер надземних водова, како би обезбедили критичну количину тачака која омогућује поуздану обраду података уз максималну аутоматизацију процеса.

4.2. Премоер

Премоер лидаром је прилично удобан и сигуран процес. Планирањем сесија задају се жељени параметри премоера, на основу којих софтвер израчунава 3Д путању лета за потпуно аутоматско летење и премоер.

Дрон се расклапа, прикључује му се лидар, улажу се батерије. Поставља се на полетно-слетно место, укључује контролер, а затим дрон. Радио веза контролер-дрон остварује се аутоматски, план премоера преноси се у дрон и премоер може почети. Дрон полеће и одлази да изврши задатак вођен аутопилотом. Све се одвија аутоматски, док оператер надзире процес.

Процес лета и премоера прати се на екрану контролера (слика 2). У сваком тренутку види се позиција дрона на карти, поглед кроз његове камере, чак и облак тачака се може приказати у реалном времену. Стање батерије, висина летелице, брзина лета, температура, брзина ветра и други статусни параметри такође су присутни.



Слика 2 - Надзор процеса рада. Слика екрана теренске апликације на контролеру.

Након извршеног задатка или пражњења батерија дрон се враћа на полетно-слетно место. Ако посао није завршен, потребно је променити батерије и притиснути дугме за наставак рада.

Са једним паром батерија може се снимити 1 до 2 km трасе, зависно од ширине коридора, броја прелета, брзине лета. Због законских ограничења и безбедносних разлога, дугачка траса се не може снимити са једног места, што значи да је неопходно планирати премештања дуж трасе и коришћење више полетно-слетних места. То налаже претходни обилазак трасе, анализу објеката у појасу коридора, уочавање потенцијалних препрека и безбедносних изазова, планирање путева кретања током премештања са локације на локацију. Такође је потребно располагати са више парова батерија, како би се осигурао континуиран рад без непотребног чекања на пуњење батерија.

Полетно-слетно место пожељно је поставити на средину области премера, а не на крајеве, како би се осигурао ефикаснији рад оличен у бржем путовању дрона до крајњих тачака, бржи почетак рада, мање празног хода у непродуктивном лету, бржи повратак кући, боља радио веза, већа безбедност.

4.3. Обрада и анализа података

Обрада података има следеће фазе:

- Основна обрада сирових података мерења
- Класификација облака тачака
- Векторизација проводника
- Анализа објеката у околини проводника.

Обрада података је високо аутоматизована и веома ефикасна. Прве две фазе извршавају се аутоматски одговарајућим софтверима. Евентуалне корекције изводе се изменом параметара и понављањем аутоматске обраде. Неисправна класификација тачака може захтевати ручне корекције. У зависности од коришћеног софтвера та активност може бити мање или више сложена и временски захтевна. Аутоматска класификација проводника типично је веома поуздана и захтева мало накнадних исправки.

Векторизација проводника је интерактиван полуаутоматски процес. Користи се напредан софтвер са специјалним функцијама за ову намену. Од оператера се очекује да изабере почетни скуп тачака које дефинишу проводник, а затим софтвер аутоматски препознаје остале тачке, "путује" дуж проводника и формира 3Д линију. У случају мањих прекида или недостатка мањег броја тачака, алгоритам може да превазиђе неправилности и поуздано формира целовиту 3Д линију проводника.

Векторизовани проводник је математички дефинисана 3Д линија која се користи за даље анализе. Функције за аутоматску проверу угрожености водова анализирају облак тачака у задатој околини проводника и означавају оне позиције на проводнику које су најближе околним тачкама.

Ово су драгоцене функције које значајно олакшавају анализу положаја проводника дуж коридора и максимално штеде време. Уместо дуготрајне визуелне анализе и ручних мерења по екрану, софтвер аутоматски издваја позиције од интереса и усмерава пажњу оператера на њих.



Слика 3 - Пример подужног профила надземног вода 110 kV дуж једног распона.
(Слика екрана софтвера DJI Terra)

5. ОГЛЕДИ

Ради утврђивања оптималних параметара премера извршено је више огледа на локацијама са различитим теренским окружењима:

- Терен: равничарски и брдовит.
- Вегетација: голо тло (њиве), приземна вегетација (пашњак, низак усев), средња вегетација (грмље), висока вегетација (шума).

- Надземни водови: 10 kV, 35 kV, 110 kV.
- Висине стубова: до 35 m.
- Пружање водова: самостално, укрштено, паралелно.
- Висина лета: 50 до 70 m изнад гла.
- Брзина лета: 7 - 12 m/s (25 - 43 km/h).
- Ширина коридора: 50-60 m.

Огледи на равничарском терену коришћени су за анализу утицаја висине и брзине лета на квалитет резултата, као и типичних норми снимања на терену који не садржи посебне изазове и омогућује највећу продуктивност.

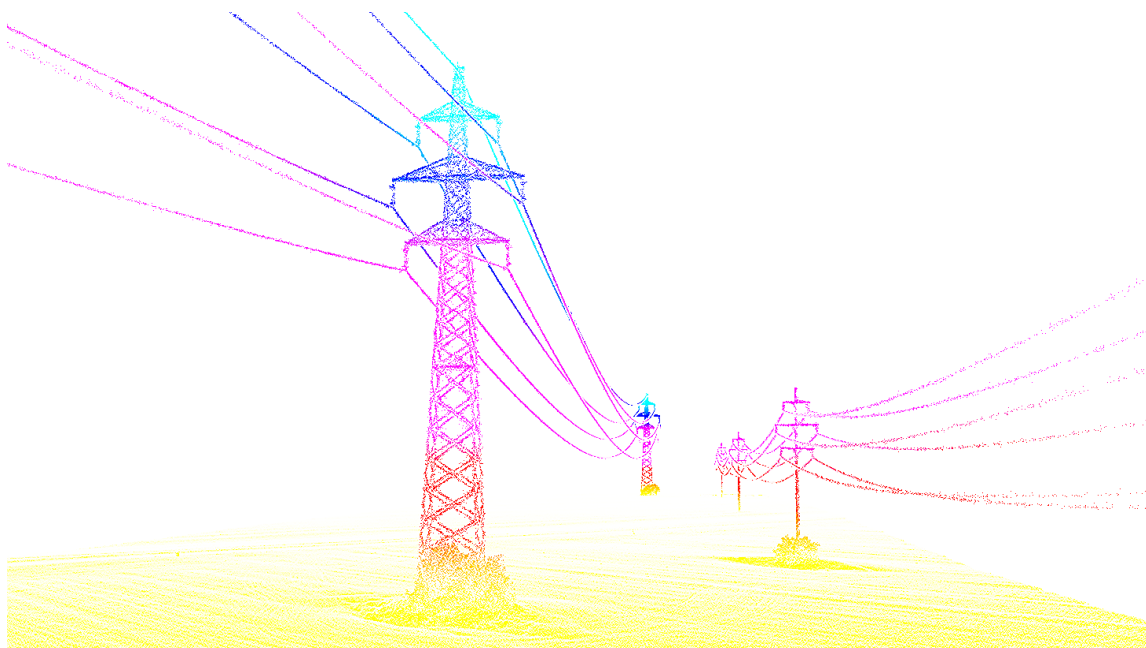
Огледи на брдовитом терену имали су за циљ анализу рада у изазовним условима, на терену различитих висина, где дрон не може да лети на истој висини, већ мора да је мења у зависности од промене конфигурације земљишта. Такви терени богати су мешовитом вегетацијом, почев од пашњака, преко грмовитих простора, до шума са високом листопадном и четинарском вегетацијом, које могу представљати потенцијалну опасност за надземну мрежу, као и за сам дрон у случају лошег планирања.

На оба типа терена пружали су се појединачни надземни водови, паралелни водови са дугим заједничким правцима, као и укрштени водови различитих напонских нивоа.

Ширина коридора од 50-60 m (25-30 m лево и десно од осовине коридора) сматра се довољном за анализу положаја свих објеката у појасу коридора. Омогућује премемер у два пролаза, док би шири коридор захтевао додатне прелете, што би драстично успорило рад.

У случајевима када се више паралелних водова пружа у једном правцу на прилазу или излазу из трансформаторских станица, намеће се потреба за снимањем ширих коридора, што значи већи број прелета изнад проводника. Уколико на некој локацији постоји више укрштања и рачвања мреже на ширем простору, може бити погодније радити површински премемер.

Слика 4 приказује два паралелна надземна вода мреже 110 kV и 35 kV, на стубовима значајно различитих висина (35 m и 15 m). Намеће се питање могу ли се премемерити једним брзим прелетом, на којој висини и којом брзином. Огледи су показали да инсистирање на једном пролазу доноси више штете него користи, због чега се препоручује снимање у два прелета, једном изнад вода 35 kV, а другом изнад вода 110 kV. Такав начин рада може се подесити у софтверу за планирање. Табела 2 приказује резултате огледа.



Слика 4 - Пример премемера паралелних водова 110 kV и 35 kV на равничарском терену.
(Слика екрана софтвера DJI Terra)

Табела 2 - Преглед параметара огледа и закључци

Висина лета	70 m	Прихватљиво за надземну мрежу 110 kV и стубове висине 35 m. Превисоко за надземну мрежу 35 kV са стубовима висине 15 m због велике удаљености од проводника. Приметан је мањи број мерених тачака. Заштитно уже уопште није регистровано. Непримењиво за мреже 10 kV.
	50 m	Прихватљиво по броју тачака за 35 kV. Ниско за премеер водова 110 kV због непотребно велике близине проводнику и мањег захвата појаса лево и десно од коридора. Није погодно за снимање паралелних водова у једном пролазу, јер видни угао не може да обухвати високе стубове мреже 100 kV, који бивају одсечени при врху.
	60 m	Оптимална висина лета за премеер паралелних надземних водова на стубовима висине 35 и 15 m – у два пролаза (одлазни и повратни лет). Премеер у два лета осигурава већи број мерних тачака, што превазилази недостатак велике удаљености од проводника у случају мреже 35 kV.
Брзина лета	12 m/s	Прихватљиво за мерење проводника. Приметан је мањи број тачака на нижим проводницима удаљенијим од дрона. Заштитно уже није видљиво на мрежи 35 kV.
	7 m/s	Добар број тачака за проводнике и заштитно уже. Спор и нерационалан рад. Уместо једног спорог прелета боље је имати два брза, због већег броја тачака, различитих мерних углова, избегавања заклона.
	10 m/s	Солидна брзина и добар број тачака на свим елементима. Уз пажљиво планирање правца лета у самој вертикали проводника, обезбеђује добар број тачака на проводницима и заштитном ужету.

6. ЗАКЉУЧАК

Изведени огледи потврдили су да је лидар технологија изузетно корисна за мерење и праћење промена на коридорима надземних водова.

Примена дрона опремљених лидаром оправдала је очекивања. Опрема је малих димензија, практично спакована, лако се преноси, саставља и брзо ставља у погон. Резултати су квалитетни, до њих се долази без већих проблема, а цео поступак је релативно једноставан, добро контролисан и великим делом аутоматизован.

Уколико је потребно брзо реаговање због ванредних догађаја, премеер неке локације или трасе може се извршити брзо, као и пратећа обрада података. Планирање теренских сесија је лако и може се учинити унапред у бироу или на самом терену након увида у затечену ситуацију. Огледима установљени параметри допринеће ефикасном планирању, квалитетним и поузданим резултатима у разним теренским ситуацијама.

Дронови и лидар који су примењени у овим огледима спадају у економску класу, али њихови резултати су високо професионални и јако употребљиви. Мерну опрему потребно је подржати додатним софтверима за специфичне анализе, како би се максимално олакшао пут од терена до коначних резултата, а тиме омогућило правовремено доношење одлука на основу њих.

Стручњаци одржавања, пројектанти и други, добили су сјајан алат који омогућује ефикасно прикупљање велике количине података од дугорочног значаја. Навикните се на размишљање о облацима тачака, на рад са тродимензионалним подацима, планирајте их у својим пројектима.