

## МУЛТИФУНКЦИОНАЛНИ СИСТЕМ ВОЂЕЊА МАЛЕ БЕСПИЛОТНЕ ЛЕТИЛИЦЕ

Владимир Смиљаковић, Зоран Голубичић, Предраг Манојловић, Ненад Поповић  
Институт ИМТЕЛ, Београд

**Садржај** – Рад приказује систем за вођење малих беспилотних летилица модификован за једну специфичну цивилну примену. Главна намена система – снимање профила терена изнад кога пролазе радио-релејне трасе – захтева високу тачност одређивања позиције летилице. За одређивање позиције летилице са високом тачношћу поред стандардних система навигације, GPS-а и секундарног моноимпулсног радара, употребљен је и систем за мерење даљине са високом резолуцијом, коришћењем сигнала са проширеним спектром као и идентификација терена помоћу видео снимака.

### 1. УВОД

Цивилне примене малих беспилотних летилица ослобађају их неких строгих захтева које пред њих постављају војне апликације. То су углавном захтеви за аутономношћу лета, могућности инерцијалног пасивног вођења, минималним електромагнетним зрачењем у току мисије и слично. С друге стране већа производна цена и трошкови експлоатације ових летилица најчешће не представљају приоритетни проблем у пројектовању, изградњи и током коришћења, наравно до извесних граница, својствених намени.

Цивилне примене мале беспилотне летилице са своје стране захтевају решења са релативно ниском ценом али и са неким карактеристикама које код војних потреба није потребно задовољити. Летилице које се користе за снимање профила терена морају имати могућност веома тачно одређивања своје позиције. Тачности које се могу постићи класичним GPS пријемницима или секундарним радарима придруженим станицама за навођење се не могу сматрати задовољавајућим у геодетским применама. Висока резолуција коју омогућава диференцијални GPS пријемник се може остварити једино уз помоћ предајника грешке али су ретка подручја покривена таквим предајницима.

За разлику од војних примена, беспилотне летилице се у цивилним апликацијама користе у "пријатељском" окружењу то јест није неопходно издвајати станице за вођење на територију ван домаћаја непријатеља. Припреме за лет најчешће се не морају обављати у изнуђеним условима, осим у случајевима елементарних непогода, пожара и у сличним непредвиђеним догађајима. Електромагнетски сигнал са летилице се може константно емитовати али се мора водити рачуна о ефикасности предајника да би се остварила највеће могуће аутономија летилице. За време операције се могу одабрати повољни метеоролошки услови и снимање се може обављати камерама довољне резолуције. Све ове погодности које пружају цивилни услови рада потребно је претворити у економску предност (ниску цену) летилице и система у целини. Због тога је у беспилотну летилицу уграђен систем за вођење са компонентама ниске цене и сложености.

### 2. ПРИМЕЊЕНИ СИСТЕМИ ОДРЕЂИВАЊА ПОЛОЖАЈА

#### 2.1 GPS пријемник

Основни мод вођења беспилотне летилице представља вођење беспилотне летилице помоћу GPS пријемника [1]. Основна предност коју има овај начин вођења је у томе што не захтева никакву инфраструктуру на земљи. Међутим, овај начин вођења има и своје недостатке. Резолуција којом се одређују координате летилице (коришћењем GPS пријемника) је номинално 25m мада је трајање једног импулса у PN секвенци једнако 1 $\mu$ s. Ширина спектра од 1MHz гарантује резолуцију од 150m, а боља резолуција се може добити само на основу доброг односа сигнал/шум [2]. Како се угао под којим летилица, односно GPS антена, прима сигнал са сателита мења, логично је очекивати да ће се однос сигнал/шум сигнала примљених са различитих сателита мењати. То пак има за последицу и лошију резолуцију у одређивању позиције летилице.

У случају оштријих маневара летилице може доћи до потпуног прекида пријема сигнала са сателита. У случају потпуног прекида пријема сигнала са сателита не само што се квари резолуција у одређивању координата већ може доћи до тренутног прекида у одређивања координата због тога што је пријемнику потребно извесно време да се синхронизише на сигнал са новог сателита. При томе неки пријемници још неко време шаљу податке о последњој регуларно одређеној или естимираној позицији. То може бити веома опасно за примене код којих је важно тачно знати у којој позицији летилице је дошло до аквизиције одређених података. Проблем се може решити употребом више пријемника распоређених на различитим позицијама летилице али то усложњава и компликује систем.

Стандардни GPS пријемници имају и лошију тачност у одређивању висине у односу на тачност коју имају у одређивању географских координата. Координате које одређује GPS пријемник су глобалне координате и уколико се у близини не налази ни једна станица која емитује сигнал грешке (диференцијални GPS пријемник) координате добијене помоћу GPS пријемника се могу значајно разликовати од локалних координата.

Поред наведеног треба имати у виду да су системи глобалне навигације власништво великих светских сила и оне из неких политичких и војних разлога задржавају право да селективно унесу поремећаје у синхронизацији сигнала чиме смањују резолуцију система. При томе оне кориснике GPS навигације обавештавају селективно, а већину комерцијалних корисника (којих је у свету све више) често уопште и не обавештавају. Тиме могу бити погођене и оне области које немају директне везе са политичким и војним сукобима. Због тога се GPS пријемник користи углавном за грубу навигацију летилице и њено вођење у делу у коме прецизност одређивања њене позиције није

критична, иако се у свету чине напори да се усавршавањем система GPS побољша тачност података о положају објекта на коме се налази пријемник GPS сигнала.

## 2.2 Моноимпулсни примопредајник у станици за вођење

Моноимпулсни примопредајник у станици за вођење поседује резолуцију која опада са растојањем [3]. Угаона резолуција коју поседује моноимпулсни пријемник обрнуто је пропорционална ширини антенског снопа а директно пропорционална односу сигнал/шум. То значи да апсолутна тачност мерења угаоних координата опада са растојањем летилице од станице за вођење, не само зато што се антенски снопа шири са растојањем већ и због тога што опада ниво пријемног поља односно однос сигнал/шум. Ширина снопа у метрима опада приближно линеарно са растојањем док однос сигнал/шум опада са квадратом растојања.

Да би се добила висока резолуција у одређивању позиције летилице потребно је да моноимпулсни пријемник прима сигнал са летилице са високим односом сигнал/шум а то се може постићи или великом израченом снагом са летилице или високом осетљивошћу пријемника на станици за вођење. Висока осетљивост се може постићи или уским пропусним опсегом пријемника или великим појачањем (директивношћу) пријемне антене. Генератор велике предајне снаге би био велики потрошач енергије система на летици па је такво решење неприхватљиво – потрошња енергије је кључни фактор за одабир елемената који се уграђују на летилицу.

Сужавање пропусног опсега пријемника и сужавање ширине антенског снопа директно утичу на повећање захтева за динамику механичког система за праћење летилице, а тиме и његове цене. То истовремено значи и да систем за праћење може тада лакше да “изгуби” летилицу из свог снопа, што проузрокује да се прекине комуникација, а тиме и да настане губитак корисних података.

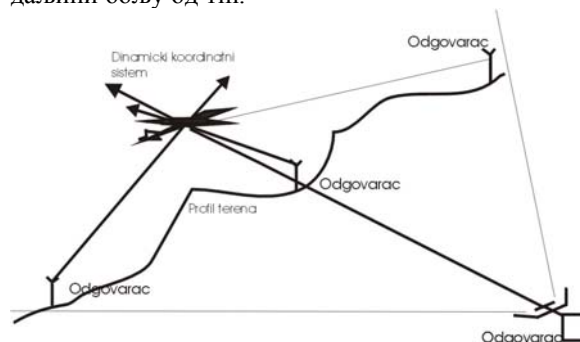
Да би аквизициони системи на летици сакупљали податке синхронно са променом положаја неопходно је да тренутно шаљу снимљене податке ка станици за навођење јер само она зна тренутну позицију летилице или да МБЛ податке о свом тренутном положају стално прима са станице за навођење (директно или преко неког посредника – систем GPRS–а на пример) и корелише са прикупљеним подацима. Овакав систем вођења летилице спада у 2D системе и за податак о трећој координати мора се користити неки од висиномера. У старијем систему [3] коса даљина се мерила помоћу сложеног радарског импулса кодованог Баркером секвенцом. Предајни сигнал је био некохерентан тако да је добитак обраде био испод 11dB.

## 2.3 Триангулациони метод

Са захтевом за цивилну примену мале беспилотне летилице захтеви за тачно одређивање позиције, због једне од предвиђених намена су постали строжији и као најједноставнији метод уведен је метод триангулације. Оно што овај (иначе стари и добро познат) метод чини атрактивним јесте врло висока резолуција у одређивању координата са минималном

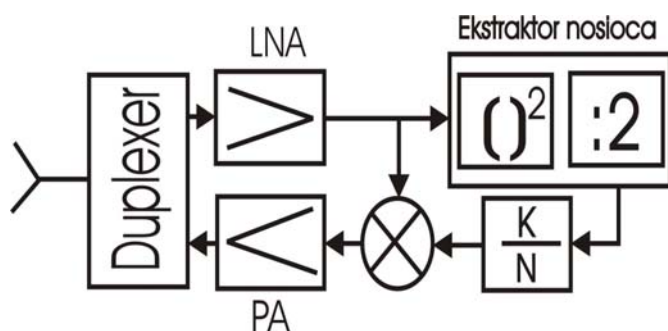
снагом коју предајник са летилице зрачи. То се постиже употребом континуалног сигнала са проширеним спектром зраченим омнидирекционом антенном са летилице тако да пријемници и предајници и на земљи и на летици немају проблема са одржавањем везе при промени положаја летилице.

Податак о свом положају летилица формира у свом рачунару тако да га може корелисати са аквизиционим системом. Ширина спектра навигационих сигнала износи 150MHz што обезбеђује резолуцију по даљини бољу од 1m.



Слика 1. Позиције одговарача у триангулационом методу

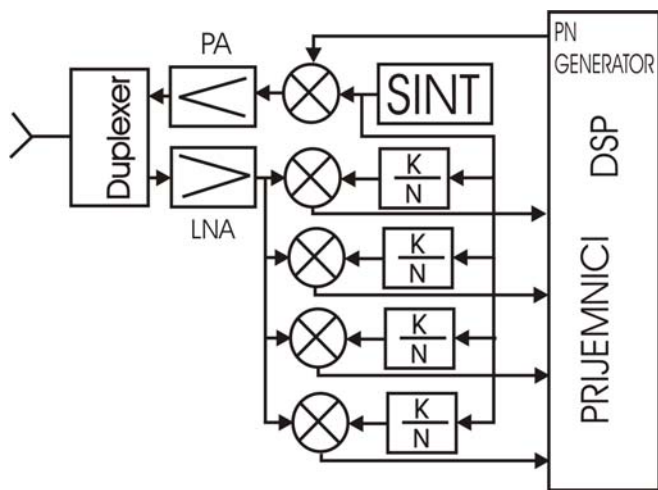
Систем ради тако што се неколико активних одговарача постављају у оси лета летилице на крћим растојањима а један одговарач се поставља у оси ортогоналној на осу лета на дужем растојању. Позиције одговарача су унапред добро познате и уписане у меморију рачунара на летици. Предајник на летици, помоћу омнидирекционе антене, шаље фазно модулисани носилац PN секвенцом брзине 150 Мбит/сек. Одговарачи примају сигнал са летилице, транспонују га на другу фреквенцију и емитују ка летици. Пријемник на летици врши корелацију примљене секвенце са послатом. Пријемници на одговарачима регенеришу носилац са летилице и помоћу њега (у одређеном односу) генеришу предајне сигнале. Тиме се смањује неодређеност у фреквенцији носилаца која је последица Доплеровог ефекта. Систем је приказан на слици 1.



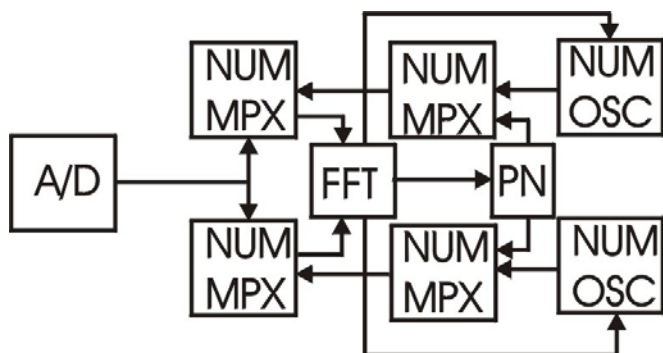
Слика 2. Блок шема репетиторске станице (одговарача)

Претпоставка је да је максимална брзина летилице 50m/s (180 км/час) то јест да она пређе растојање од 1m за 20ms. Теријски то значи да би систем могао да ради са пропусним опсегом од 100Hz али ради сигурности ћемо повећати пропусни опсег на 150Hz. Предајник на летици има снагу од 10mW па је однос сигнал/шум у пријемнику на 10km растојања једнак 75dB. Овакав

однос сигнал/шум би се постигао са процесним појачањем од 60dB. Оно се не може остварити процесорима оне процесорске снаге који се смештају у летилицу и због тога се процесно појачање од 30dB остварује кохерентном обрадом а остатак од 15dB некохерентном интеграцијом. Што је одговарач удаљенији од путање лета он користи усмеренију антену тако да надокнађује губитке у простирању таласа. Предајник на летилици предаје сигнал на L опсегу док му пријемници раде на S опсегу. Мала предајна снага и широк спектар сигнала доприносе да је густина средње снаге значајно смањена тако да предајник са летилице не уноси велике интерференције другим системима на L опсегу. Блок шема корелатора приказана је на слици 4. Мултиплексери и нумерички осцилатори су реализовани помоћу FPGA кола. Посебна кола представљају PN генератори и FFT процесори. Реализација дигиталног пријемника помоћу DSP процесора је врло проблематична због велике брзине обраде. То би захтевало врло скупе процесоре са великом ценом и тешком набављивошћу.



Слика 3. Блок шема примопредајника на летилици



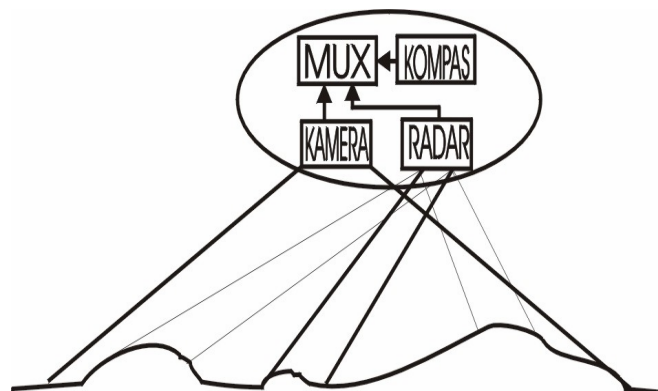
Слика 4. Дигитални пријемник

#### 2.4 Навођење летилице помоћу слике.

Пренос телевизијске слике представља једну од основних намена и функција коју беспилотна летилица треба да обави. Како се претпоставља да у цивилним

мисијама летилица лети изнад познате територије, могуће је одредити позицију летилице на основу телевизијске слике и даљиномера спрегнутог са платформом на којој се налази камера. Како се снимање терена обично обавља у погодним метеоролошким условима то се за мерење даљине користи полупроводнички ласер мале снаге или ултраширокопојасни радар који ради на милиметарском таласном подручју.

Радар опсега од 25GHz до 28GHz има резолуцију од 0.1m и ширину снопа од 3° што значи да је ширина спота на земљи који потиче са антене која је на висини од 1000m износи 50m. Мерењем угла под којим се види познати део терена, као и мерењем растојања, може се одредити позиција летилице. Да би одредили косо растојање потребно је померати ласерски или радарски сноп. Радарски сноп се може померати електронским путем тако да су избегнути механички елементи. Како је потребно пре свега померање снопа по једној равни (управној на осу лета) то се промена фазе врши по једној оси док се померање снопа по другој оси врши променом фреквенције висиномера. Како је анализа слике и радарског одраза релативно сложен процес за чију је обраду потребна већа процесорска снага, процес анализе се мора обавити на земаљској станици. На слици 6 су приказани снимци на основу којих је могуће одредити позицију летилице.



Слика 5. Блок шема система за вођење помоћу камере

### 3. ЕТАПЕ ВОЂЕЊА У ТОКУ ЛЕТА МБЛ

Процес вођења је замишљен тако да се летилица у првом делу лета води помоћу GPS система, уколико је то могуће, или помоћу станице за вођење. Уласком у подручје у коме је потребно извршити прецизно снимање профила терена, тј у коме се примењује одређивање положаја летилица поступком триангулације, летилица успоставља синхронизацију са одговарачима и само шаље извештаје о прикупљеним подацима станици на земљи. Користећи податке са електронског компаса и инклинатора аутоматика на летилици усмерава радарски даљиномер према подручју у коме мери висину односно растојање од летилице. МБЛ се креће по трајекторији испланираној током претполетне припреме и током кретања по одређеним сегментима трајекторије прикупља податке. Уколико током лета нема непредвиђених околности, по извршеном плану снимања МБЛ се враћа и приземљује.



Слика 6. Снимци карактеристичних места на основу којих се одређује позиција летилице

## ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан предлог побољшања перформанси постојећег система за одређивање положаја мале беспилотне летилице, што је неопходно да би се систем МБЛ могао користити у применама код којих се тражи што тачније одређивање позиције објеката на земљи који су иначе тешко приступачни (на пример снимање профила терене за трасе радио релејних линкова). Предложено побољшање чија реализације не изискује енормне инвестиције у односу на укупну цену система МБЛ омогућује једноставну примену у експлоатацији.

## Литература

[1] V.Smiljaković, Z. Golubičić, P.Manojlović, D.Obradović, N.Popović, Z. Živanović „Application of Integrated Autonomous Microwave Position Finding System and GPS for UAV Navigation, Telsiks 2003. Niš, 1-3 October 2003 pp 475-478.

[2] Samuel Sherman Monopulse Principles and Techniques, Artech House 1985.

[3] V.Smiljaković, Z. Golubičić, P. Manojlović, Z. Živanović „Autonomous Distance Finding Microwave System for Middle Range Remotely Piloted Vehicle, ICEST 2002. Niš, 1-4 October 2002 pp 229-232.

**Abstract** – Multifunctional microwave guidance system for small unmanned aerial vehicle system with improved position finding capabilities over in advance defined areas needed for some commercial applications is presented in this paper. Simple for use and with affordable price, method is based on triangulation of appropriately positioned microwave transceivers on Earth's surface.

## MULTIFUNCTIONAL GUIDANCE SYSTEM FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE

Vladimir Smiljaković, Zoran Golubičić, Predrag Manojlović, Nenad Popović