

## ДИЗАЈН И ЕВАЛУАЦИЈА АЛГОРИТАМА ЗА МЕРЕЊЕ УДАЉЕНОСТИ ЗАСНОВАНЕ НА ВРЕМЕНУ ДОЛАСКА СИГНАЛА (TOA) ЗА IEEE 802.11AZ DESIGN AND EVALUATION OF TIME OF ARRIVAL (TOA)-BASED RANGING ALGORITHMS FOR IEEE 802.11AZ

Андреј Скала, Факултет техничких наука, Нови Сад

### Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

**Кратак садржај** – У овом раду је представљен алгоритам за процену долазног времена сигнала назван ЛЦЦ алгоритам, као алтернатива са ниском комплексношћу МУСИЦ алгоритму. Оба алгоритма су имплементирана у систему за позиционирање и њихови резултати су дискутовани за различите параметре.

**Кључне речи:** MUSIC, Wi-Fi, ToA естимација

**Abstract** – This paper presents a ToA estimation algorithm called LCC as a low complexity alternative to MUSIC. Both algorithms were implemented in a positioning system and their results were discussed in respect to different parameters.

**Keywords:** MUSIC, Wi-Fi, ToA estimation

### 1. УВОД

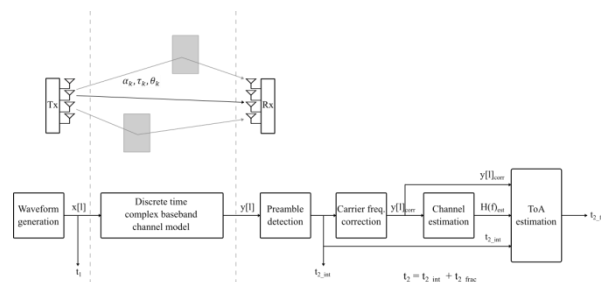
Са појавом Интернета Ствари (енг. *Internet of Things* IoT), прецизна локализација у затвореним просторијама је добила на значају [1]. Разни системи за локализацију су развијени, користећи различите бежичне технологије и разне методе и алгоритме, као што су методе засноване на долазном углу сигнала (енг. *Angle of Arrival* AoA), времену доласка сигнала (енг. *Time of Arrival* ToA) и примљеној снази сигнала (енг. *Received Signal Strength* RSS). Главни проблем за ToA технике јесте прецизна естимација пропагационог кашњења радио сигнала из директног правца (енг. *direct line of sight* DLOS) [1]. Овај рад разматра популарни ToA алгоритам који се зове MUSIC [1] и уводи алгоритам ниске сложености заснован на корелацији назван LCC (енг. *low complexity correlation*).

### 2. МОДЕЛ СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС СИГНАЛА

Модел система за пренос сигнала и процену ToA. се састоји из три главне компоненте: предајник са више антена, дискретни (комплексни) модел канала и пријемник са више антена. Предајник генерише Wi-Fi сигнал и бележи време почетка преноса. Модел канала моделира стварне сложености затвореног простора са више пропагационих путања (енг. *indoor multipath environment*), узимајући у обзир ефекте рефлексије и

кашњења сваког пута сигнала [2].

Коначно, пријемник, опремљен вишеструким антенама, детектује преамбулу, врши корекцију времена и фреквенције, као и процену одзива канала у фреквенцијском домену. На крају, користећи информације које је добио из примљеног пакета, процењује време доласка сигнала. Важно је напоменути да сваки део модела система уводи ограничење у укупну тачност процене ToA, од бележења времена, до детекције почетка преамбуле и естимације канала и ToA.



Слика 1. Блок дијаграм општег модела за пренос сигнала и естимацију ToA

### 3. LCC АЛГОРИТАМ

LCC (енг. *Low complexity correlation*) је једноставан алгоритам за естимацију времена доласка пакета који не користи естимирани фреквентни одзив канала као MUSIC, већ користи послат и примљене сигнале као улаз. Базира се на корелацији примљеног сигнала са послатим сигналом који је закашњен за  $\tau$  из неког интервала, а резултат је псеудоспектар који ће имати максимум за  $\tau$  који је најближи ToA. У зависности од тога да ли су сигнали који се корелишу у временском или фреквенцијском домену разликујемо две верзије алгоритма: TLCC верзија (у временском домену) и FLCC верзија (у фреквенцијском домену). Испоставља се да обе верзије имају сличну прецизност, али се могу разликовати у сложености. Фокус овог рада је на FLCC верзији.

#### Кораци FLCC алгоритма:

Корак 1: Израчунати брзу Фуријеову трансформацију (енг. FFT) послатих и примљених сигнала.

Корак 2: Конструисати псеудоспектар за сваку пријемну антену тако што се, за свако кашњење  $\tau$  из одређеног интервала са кораком  $\Delta\tau$ , пропорционално промени фаза одбирака спектра послатог сигнала  $Tx(n)$  и добијени спектри корелишу са спектром примљеног сигнала  $Rx_m(n)$ :

### НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Иван Мезен, ред. проф.

```

for  $\tau = \tau_a : \Delta\tau : \tau_b$ 
     $TxDelay(n, \tau) = Tx(n) \cdot e^{-j \cdot \tau \cdot g(n)}$ 
for  $m = 1 : M$ 
     $P_m(\tau) = |TxDelay(n, \tau)^H Rx_m(n)|^2$ 
end
end

```

Корак 3: Нађи локације глобалних максимума спектра за сваку антену (i.e.  $\tau_m$ ).

Корак 4: ТоА је средња вредност тих локација.

$n = 1, 2, \dots, N$  је редни број одбирка спектра сигнала,  $m = 1, 2, \dots, M$  је редни број антене пријемника.

Једна од важних карактеристика LCC алгоритма је то што корак  $\Delta\tau$  може да буде било које величине, од реда величине целог одбирка до дела одбирка. Ово значи да се LCC алгоритам може користити и за процену целог дела и децималног дела кашњења. Обе могућности су анализирани у овом раду.

Још једна могућа оптимизација за обе верзије LCC алгоритма је да, ако су интервал претраге и корак унапред познати и послати сигнал се не мења, све вредности послатих сигнала са кашњењем ( $tx(Tx)Delay$ ) је довољно израчунати само једном на почетку алгоритма. Овим се алгоритам своди само на рачунање псеудоспектра и тражење локација његових максимума.

### 3.1 Анализа комплексности

Ако је  $r = \tau_b - \tau_a$  величина интервала претраге,  $\Delta\tau$  је величина корака,  $N$  ће бити коришћен као број одбирака  $tx(Tx)Delay$  и  $rx_m(Rx_m)$  и  $M$  је број антена пријемника, онда се број операција множења за TLCC и FLCC верзије налази у табели 3.

Табела 1. Број операција множења коришћених у TLCC и FLCC верзијама, са и без оптимизације рачунања  $tx(Tx)Delay$  на почетку

Верзија алгоритма	Број операција множења (без рачунања $tx(Tx)Delay$ на почетку)	Број операција множења (са рачунањем $tx(Tx)Delay$ на почетку)
TLCC	$\frac{r}{\Delta\tau} \cdot (2N \log N + N + MN)$	$\frac{r}{\Delta\tau} \cdot M \cdot N$
FLCC	$2N \log N + \frac{r}{\Delta\tau} \cdot (N + MN)$	$N \log N + \frac{r}{\Delta\tau} \cdot M \cdot N$

Може се видети да FLCC верзија има мање множења у случају без оптимизације рачунања  $tx(Tx)Delay$  на почетку. Такође се може видети како та оптимизација може додатно да смањи комплексност. Један критични параметар јесте  $\frac{r}{\Delta\tau}$ , број временских јединица за које се рачуна псеудоспектар. Већи интервал претраге или већа жељена прецизност (мањи корак) повећавају време извршавања алгоритма.

Други критични параметар јесте  $N$ , број одбирака сигнала који се користи у корелацији. За TLCC

верзију,  $N$  је број временских одбирака улазног таласног облика, а за FLCC је број одбирака FFT дискретног спектра улаза.

За довољно мале дужине улаза, ова два броја су сличних величина. У овом раду, цела дужина пакета заједно са његовим кашњењем је узета за улаз алгоритма, пошто је то кашњење краће од 20 одбирака, али у реалним условима оно може бити много дуже и треба се одстранити. Друга могућност је да се користе само делови преамбуле као улаз, али како ово може утицати на перформансе би требало посебно испитати.

## 4. СИМУЛАЦИОНА СТУДИЈА

Оба алгоритма су имплементирани у систему за позиционирање. Систем се састоји од станице (енг. *station STA*), чију позицију покушавамо да израчунамо и најмање три приступне тачке (енг. *accesspoint AP*) на познатим позицијама.

Поступак за позиционирање започиње мерењем удаљености између станице и сваке приступне тачке. Мерење се обавља у два смера за сваку везу: *uplink* и *downlink*, што значи је за мерење удаљености за сваку везу потребно 2 трансмисије и ТоА естимације описане у поглављу 2. Средње време две трансмисије се користи за рачунање удаљености. Када су познате све удаљености, позиција станице се естимира коришћењем нормалне једначине за линеарну регресију са функцијом цене за најмањи квадрат.

### 4.1 Параметри симулације

Параметри симулације могу да се поделе у параметре система, предајника, канала и пријемника. Више симулационих експериментана је обављено, где су системски параметри увек остали исти, док су се остали параметри могли мењати сваки експеримент. Симулација је рађена користећи Matlab 2022b и WLAN додатак.

#### 4.1.1 Параметри система

Поставка сваког експеримента је велика соба, димензија 30m x 50m са три приступне тачке у три ћошка собе са координатама ((0,0), (30,0), (0,50)) у ху равни. У сваком експерименту се симулира позиционирање 100 станица које су распоређене на насумичним позицијама са униформном дистрибуцијом унутар собе. Ови значи да сваки експеримент симулира 600 преноса и ТоА естимација. Коришћена је SNR вредност од 25dB

#### 4.1.2 Параметри предајника

Параметри предајника су:

- Предајник шаље 802.11az NDP (*Null Data Packet*)
- Носећа фреквенција је 5GHz
- Број понављања HE-LTF поља је 3
- Променљив пропусни опсег (40MHz и 80MHz)
- Променљив број антена предајника (од 1 до 8)

### 4.1.3 Параметри канала

За модел канала са више путања је коришћен TGax модел типа "B" (B) [3]. Овај модел имитира реалистично понашање у стамбеним просторијама.

### 4.1.4 Параметри пријемника

За ТоА естимацију су коришћени MUSIC и FLCC алгоритми. Како би се тестирали различити аспекти FLCC алгоритма, његов блок има више верзија:

FLCC - Ово је основна верзија где се цели део почетног одбирка  $t_{2\_int}$  рачуна у блоку за детекцију преамбуле који се базира на аутокорелацији примљеног сигнала, а FLCC естимира децимални део почетног одбирка  $t_{2\_frac}$  тако што пролази кроз интервал од једног одбирка око  $t_{2\_int}$  ( $[t_{2\_int} - 0.5, t_{2\_int} + 0.5]$ ) са кораком 0.01 (укупно 101 корак).

У овој верзији, FLCC зависи од несавршене детекције преамбуле да сузи простор претраге за њега. Ова верзија се може директно поредити са MUSIC алгоритмом.

FLCCcorrection - У овој верзији, циљ је био да се испитају могућности FLCC за грубу процену кашњења пакета. FLCC блок сада има два дела. У првом делу се FLCC користи да покуша да исправи несавршену процену блока за детекцију преамбуле. Он пролази кроз више одбирака ([7,20] и [7,30] за фреквенције одабирања 40MHz и 80MHz) са кораком 0.5 одбирка (укупно 27 и 47 одбирка).

Након што сузи простор за претрагу, FLCC из прве верзије теста, са кораком 0.01, естимира децимални део кашњења  $t_{2\_frac}$ .

FLCCideal - Ова верзија теста користи савршену детекцију преамбуле и претпоставља савршену процену целог дела кашњења. FLCC се поново користи за децимални део кашњења. Ова верзија тестира теоретски најбоље могућности FLCC алгоритма.

Ниједна FLCC верзија не користи оптимизацију да израчуна закашњене послате сигнале ( $t_x(T_x)Delay$ ) једном на почетку. Што се тиче осталих параметара, пријемник може имати променљив број антена (од 1 до 8).

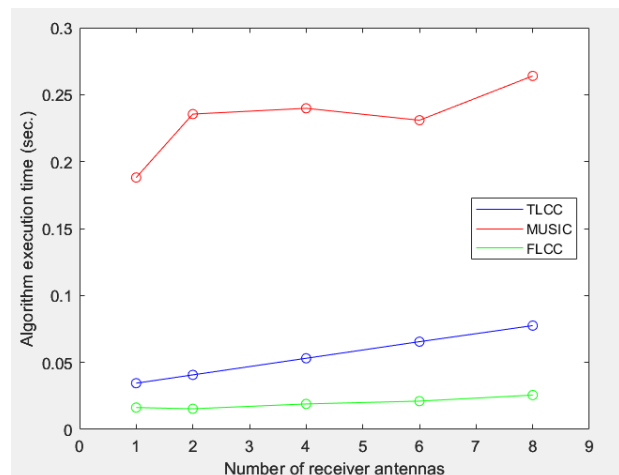
## 5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Циљ студије је био поређење алгоритама помоћу две метрике: средње време извршавања алгоритма и просечну апсолутну грешку мерења удаљености.

### 5.1. Просечно време извршавања алгоритма

Три алгоритма која су тестирана су MUSIC, LCC у временском домену (TLCC) и LCC у фреквенцијском домену (FLCC). Време извршавања сваког алгоритма је узето као време рада блока за ТоА естимацију.

Обе LCC верзије су коришћене за рачунање децималног дела кашњења и имале су интервал претраге од једног одбирка са кораком од 0.01 (укупно 101 корака) Резултати се налазе на слици 17. FLCC треба најмање времена за извршавање, 2-3 пута је бржи од TLCC и око 10 пута бржи од MUSIC алгоритма.

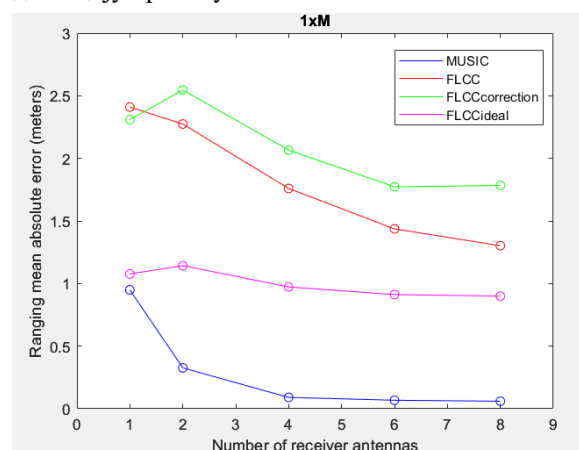


Слика 2. Резултати за средње време извршавања алгоритма за MUSIC, TLCC и FLCC за различит број пријемних антена

## 5.2. Средња апсолутна грешка мерења удаљености

### 1 xM антена и пропусни опсег 40MHz

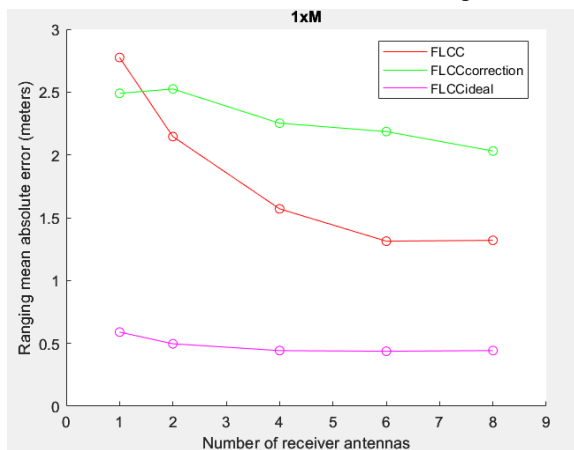
Овај експеримент пореди различите алгоритме и верзије из главе 4.1.4: MUSIC, FLCC, FLCCcorrection и FLCCideal, када предајник користи само једну антену. Види се да је MUSIC јасан победник са грешком која почиње од око 1m и брзо опада до реда величине неколико центиметара. Постоје два фактора који могу да утичу на грешку: процена целобројног дела кашњења и процена децималног дела кашњења. Моћ MUSIC алгоритма је да и поред лоше процене целобројног дела кашњења, може да исправи ову грешку и да прецизан коначни резултат. FLCC пати од овога јер се ослања на грубу процену кашњења да му сузи простор претраге и има средњу грешку 2.5m до 1.5m. FLCCcorrelation међутим, имао је још горе резултате. Када је целобројни део кашњења савршено познат, као код FLCCideal, алгоритам ради значајно боље, са средњом грешком од око 1m. Гледајући резултате на други начин, ако не бисмо имали блок за ТоА естимацију, средња грешка би била барем 7.5m, што значи да све верзије FLCC представљају унапређење у прецизности. Такође се може видети да, када поредимо FLCC и FLCCideal, да већи број антена пријемника има већи ефекат на блок за детекцију преамбуле него на FLCC.



Слика 3. Средња апсолутна грешка рачунања удаљености за сценарио 1xM антена

## 1 xM антена и пропусни опсег 80MHz

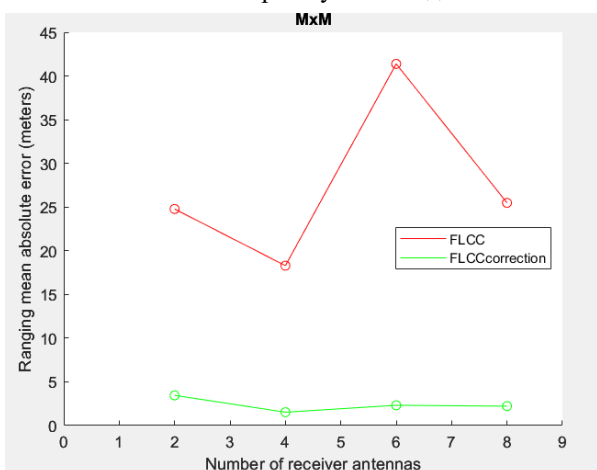
Када се ширина пропусног опсега повећа на 80MHz, експериментима са MUSIC алгоритмом је требало сувише да се заврше, али на основу тестова са мањем бројем станица може се очекивати да опет надмаши све FLCC верзије и има криву сличног изгледа као за пропусни опсег 40MHz која почиње од око 0.5m. Изненађујуће је да су FLCC и FLCCcorrection имали сличне резултате као у претходном експерименту, али се FLCCideal показао два пута боље са просечном грешком сада од око 0.5m, што значи да повећавање ширине пропусног опсега побољшава процену децималног дела кашњења код FLCC алгоритма.



Слика 4. Ефекат повећавања ширине пропусног опсега на средњу апсолутну грешку мерења удаљености

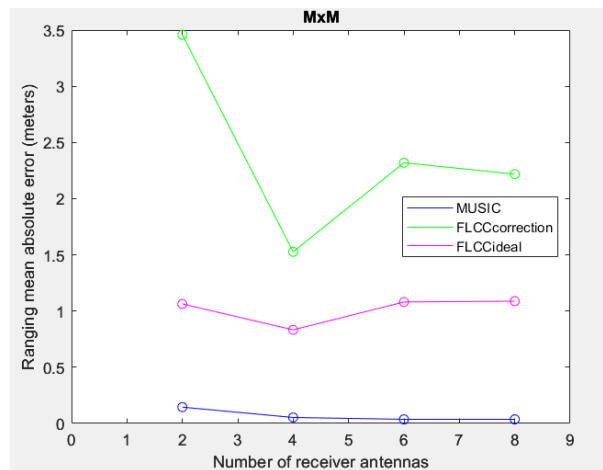
## MxM антена и пропусни опсег СВ40MHz

Више антена предајника представља нешто сложеније окружење, пошто сада примљени сигнал представља комбинацију више сигнала. Заиста, може се видети велики негативни ефекатна блок за детекцију преамбуле јер је сад средња грешка за FLCC реда величине десетине метара. FLCCcorrection ипак, успева да побољша ово и смањи грешку на испод 3.5m.



Слика 5. Ефекат више антена предајника на неке FLCC варијанте

FLCCideal има средњу грешку око 1m, слично као и код експеримента са 1xM антена. Може се видети да су са више предајних антена FLCC верије имале сличне или горе резултате него са једном предајном антену. Са друге стране, MUSIC је имао значајно побољшање у прецизности.



Слика 6. Ефекат више антена предајника на MUSIC и остале FLCC варијанте

## 6. ЗАКЉУЧАК

Циљ рада је био да се испитају перформансе LCC алгоритма као алтернативе MUSIC алгоритму са нижом комплексношћу. Резултати су потврдили да LCC има значајно краће време извршавања, где је најбржа варијанта, звана FLCC, била 10 пута бржа од MUSIC алгоритма. Што се тиче прецизности, MUSIC се показао као очигледан победник у свим тестираним сценаријима, са просечном апсолутном грешком процене удаљености добро испод 1m до реда величине неколико центиметара.

FLCC се није лоше показао у грубој процени кашњења, али је боље резултате имао у процени децималног дела кашњења и, заједно са добрим проценитељем целобројног дела кашњења, је имао грешку испод 1m или мање у зависности од фреквенције одабирања.

Корелација је операција која се већ често користи у Wi-Fi уређајима за синхронизацију, што значи да би се исти ресурси могли потенцијално искористити и за LCC. Додатне предности LCC су нижа комплексност и чињеница да му није потребна естимација канала, па се препоручује за уређаје где је нижа потрошња или уштеда ресурса битнија од велике прецизности позиционирања.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Xinrong Li, K. Pahlavan., "Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol 3, no. 1, pp. 224-234, Jan. 2004, doi: 10.1109/TWC.2003.819035.
- [2] Tarik Kazaz, Gerard J. M. Janssen, Jac Romme, Alle-Jan van der Veen, "Delay Estimation for Ranging and Localization Using Multiband Channel State Information" in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol 21, no 4, Apr. 2022
- [3] Jianhan, L., Ron, P. *et al.*, "TGax Channel Models" IEEE 802.11-14/0882r4, September 2014.

## Кратка биографија:

Андреј Скала рођен је у Новом Саду 1997. год. Дипломирао је 2022. год. на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства, смер Ембедед системи и алгоритми, на којем исте године уписује мастер академске студије.  
контакт: skalaandrej7@gmail.com