

## маг. инж. Ивайло Найденов Начев

## СРЕДСТВА И АЛГОРИТМИ ЗА АВТОМАТИЧНО КАЦАНЕ НА БЛА, ЧРЕЗ РАДИОЧЕСТОТНА ОБРАБОТКА И ПСЕВДО КОНИЧНО СКАНИРАНЕ

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки Професионално направление: 5.3. . Комуникационна и компютърна техника Научна специалност: Радиопредавателна и радиоприемна техника

Научен ръководител: проф. д-р инж. Илия Георгиев Илиев

СОФИЯ, 2023 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии" към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 03.10.2023 г. / протокол № 37.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 04.12.2023 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3 – 59 от 16.10.2023 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

- 1. Доц. д-р инж. Росен Георгиев Милетиев
- 2. Доц. д-р инж. Марин Веселинов Неделчев
- 3. Доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Ангелова
- 4. Проф. д-р инж. Емил Иванов Йончев
- 5. Проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти:

- 1. Доц. д-р инж. Росен Георгиев Милетиев
- 2. Проф. д-р инж. Емил Иванов Йончев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии" към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1250.

Дисертантът е докторант към катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии" към Факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като резултатите от тях са публикувани. Част от изследванията са вследствие на работата по научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Ивайло Найденов Начев Заглавие: Средства и алгоритми за автоматично кацане на БЛА, чрез радиочестотна обработка и псевдо конично сканиране Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

### І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

#### Актуалност на проблема

Използването на безпилотните летателни апарати (БЛА), през последните години, за различни приложения е безспорен факт. Съществуват множество Публикуват се различни разработки за тяхната навигацията и автоматичното им приземяване. Повечето от тях са базирани на диференциални GPS системи, използване на псевдо конично сканиране, с лазерна оптична завеса и разпознаване на изображение на площадката за кацане и др.

Настоящата работа представя изследване на възможностите и разработване на система за автоматично кацане на безпилотни летателни апарати. Целта и се осъществява чрез анализ, разработване и изследване на средства и алгоритми за позициониране с радиочестотна обработка и псевдо конично сканиране с намалена изчислителна сложност. Идеята е заимствана от антените с конично сканиране за автоматично скачане на космически апарати. Интегрирането на тази технология в площадки за безпилотно приземяване на БЛА, ще позволи кацането им в трудно достъпни пространства на открито и закрито. Тук тежестта пада върху анализа и дефинирането на основните изисквания и технически параметри на радио комуникационната система, която да реализира поставената идея. За да се осъществят научните изследвания в дисертацията и да се пробират предложените идеи са решени множество допълнителни задачи, свързани с проектиране, симулиране изработка и измерване на различни елементи и средства на система с псевдо конично сканиране. С оглед приложимостта на предложените идеи са изследвани и оценени ограничителните условия на работа, систематичната и случайната грешка позициониране и на тази база са разработени алгоритми за автоматично кацане и следене на БЛА, използващи специален опростен подход за определяне на ъгловите координати на обекта.

#### Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационния труд: Да се разработят средства и алгоритми на система за автоматично кацане на БЛА, чрез радиочестотна обработка и псевдо конично сканиране(ПКС) с намалена изчислителна сложност. За постигане на поставената цел е необходимо да бъдат решени следните задачи:

- Да се направи анализ на съществуващи методи за следене и навигация чрез радиочестотна обработка и начини за подобряване на радиационните параметри на техните антенни системи.
- Да се анализират различни варианти за реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством ПКС, като се дефинират основните изисквания и технически параметри на радиокомуникационната система. Да се направи критичен анализ на предложените варианти и да се избере най подходящия за приложение от тях.
- Да се дефинират техническите изисквания към AC с ПКС за реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка на амплитудата на приетия сигнал.
- Да се реализира избрания вариант на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством ПКС, чрез който да се докаже приложимостта и последващо изследване на различни методи и средства.
- Да се дефинират, реализират и изследват различни варианти за подобряване на динамичният обхват на характеристиките на АС с ПКС за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, чрез микровълнови периодични структури.
- Да се предложи подход за определяне на ъгловите координати на БЛА чрез фазирана антенна решетка (ФАР) с псевдо конично сканиране, чрез обработка на мощността на

приетия сигнал. Основната цел е подходът да дава възможност за опростена реализация на системата и да има необходимата точност за безпилотно кацане на БЛА.

- Да се изведат математически зависимости, които позволяват определянето на директната зависимост на ъгловите координати на обекта, чрез измерените мощности от псевдо конично сканиране.
- С оглед приложимост на предложения подход да се изследва и оцени систематичната и случайната грешка за позициониране – грешките за определяне на ъгловите координати, с различни конфигурации и структури на ФАР с ПКС.
- Да се разработят, изследват и определят ограничителните условия и функционалните възможности на алгоритми за автоматично кацане и следене на БЛА, използващи разработения подход за определяне на ъгловите координати на обекта.

#### Практическа приложимост

Предложените средства и алгоритми за автоматично кацане на БЛА, чрез радиочестотна обработка и ПКС са получени след теоретичен и симулационен анализ. В последствие от тях е извършена практическа реализация на системата за автоматично кацане и следене на БЛА. Проведени са практически експерименти, с които са потвърдени теоретичните и симулационни данни. Представена е приложимост на разработените средства и алгоритми за автоматично кацане на БЛА, чрез радиочестотна обработка и псевдо конично сканиране.

#### Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в общо девет научни публикации, всички от които са докладвани на международни конференции и списания. Всички публикации са индексирани в Scopus и/или Web of Science. Общият брой на цитиранията е седем.

#### Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 157 страници, като включва увод, списък на използваните съкращения, пет глави за решаване на формулираните основни задачи, основни насоки за бъдеща дейност в научната област, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 177 литературни източници, като 176 са на латиница и 1 на кирилица. Работата включва общо 168 фигури и 19 таблици. Номерата на фигурите и таблиците, както и използваните съкращения в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

### ГЛАВА 1. Литературен обзор

В първа глава е направен литературен обзор на методите и средствата за автоматично кацане на БЛА, методите за локализиране на цели чрез радиочестотна обработка, средства за подобряване качествените показатели на ФАР с ПКС чрез периодични структури.

1.4. Изводи от първа глава

След направения литературен анализ на съществуващи САС за следене на цели, видовете алгоритми и средства за подобряване параметрите на антени, както и тяхната приложимост, могат да бъдат дефинирани следните изводи:

- Разгледаните различни методи за следене и навигация на БЛА имат своите предимства и недостатъци. Съществуват методи, подходи и средства за автоматично следене на спътници и летящи обекти чрез радиочестотна обработка и конично сканиране от наземни комуникационни станции, което като идея е подходящо да се използва за навигация на БЛА в процеса за автоматично кацане.
- 2. По нататък в дисертационният труд е избран и доразвит метода с ПКС и радиочестотна обработка за автоматично приземяване на БЛА поради следните по важни предимства: висока точност спрямо спътникови навигационни системи, простота на реализация, приемливи габарити на устройствата, ниска себестойност. Въпреки по малката точност спрямо лазерно-оптичните системи за навигация и приземяване неговите предимства изпъкват ясно при условия на затруднена видимост между обектът и площадката за приземяване.
- 3. За сензор на САС за прихващане, навигиране и безпилотно приземяване на БЛА става ясно, че е възможно използването на микровълнова антенна решетка с псевдо конично сканиране и приложение на алгоритъм за управление на системата и повишаване на точността при извършване на навигационните процеси. Липсват, обаче точно дефинирани изисквания, характеристики и техническите параметри на една такава система. Необходимо е да се определят изискванията към: ФАР за прихващане и приземяване на БЛА, динамичния обхват на ФАР и техническите параметри на радио комуникационната система за реализиране на САС. Трябва да се определят необходимите хардуерни средства, както на наземната страна площадка за безпилотно приземяване на БЛА, така и необходимото хардуерно оборудване на борда на БЛА. Всичко това ще позволи да бъдат избрани подходи и съставени алгоритми за следене, навигация и приземяване на БЛА.
- 4. От разгледаните периодични структури, става ясно, че те намират широко приложение в микровълновите устройства и съвременния антенен дизайн. Възможно е интегрирането на периодични структури в САС с цел подобряване на радиационните им параметри, което води до повишаване на динамичният им обхват. От направеният литератур обзор, се вижда, че ЕВG и РВG структурите са подходящи за тази цел. В разгледаните изследвания обаче липсват точни изисквания към структурите и техните топологии за подобряване на усилването и формата на ДНД, а от там и конкретна методика за определяне на геометричните им размери. В настоящия дисертационен труд е изследвана приложимостта на периодичните структури за подобряване на параметрите на ФАР – основният сензор на системата за автоматично позициониране и кацане чрез ПКС.

### ГЛАВА 2. Анализ и дефиниране на основните технически изисквания и параметри на радио комуникационни системи за автоматично кацане на БЛА с използване на ПКС

В настоящата глава са решени следните поставени цели и задачи на дисертационния труд:

- Анализирани са различни варианти за реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством псевдо-конично сканиране, като се дефинират основните изисквания и технически параметри на радио комуникационната система. Направен е критичен анализ на предложените варианти с цел избор на най подходящия от тях за по нататъшни изследвания и приложения.
- Дефинирани са техническите изисквания към антенната решетка с псевдо-конично сканиране за реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка на амплитудата на приетия сигнал.

Навигационна система с ПКС представлява отделна автономна радио комуникационна система. Предназначена за определяне на относителното разположение на обект в пространството, спрямо собствената й координатна система. Процесът на безпилотно кацане на БЛА върху площадка се извършва по следния начин: БЛА се насочва към площадката за кацане чрез заложените налични средства и алгоритми за навигация и позициониране. След като БЛА попадне в обхвата на действие на системата с ПКС, започва работа на алгоритъма за автоматично кацане. Обхватът на системата за ПКС зависи от параметрите на нейният сензор – ФАР. Алгоритъмът от своя страна трябва да включва следните основни процеси: определяне на местоположението на апарата в пространството спрямо координатната система на площадката за кацане (ПК); следене, филтрация и насочване към центъра на координатната система – фиг.2.1.

# 2.1. Определяне на основните технически параметри към системата за безпилотно приземяване на БЛА посредством ПКС:

Системата за автоматично кацане условно се разделя на предавателна и приемна част. Интересен е въпросът за разположение на двете части. Тук са формулирани няколко варианта: **Вариант а**): Предавателната част е разположена в ПК, а приемната част се намира на БЛА; **Вариант б**): Предавателната част е разположена на БЛА, а приемната част се намира на ПК; **Вариант б**): Вместо отделен предавател може да се използват радиосигналите, излъчвани от БЛА; **Вариант г**): Възможен е вариант при който ПКС се извършва в предавателната част; **Вариант д**): Вариант използващ в приемната страна софтуерно дефинирано радио, еквивалентно по функционалност на вариант **б**).

От предложените варианти най – подходящ, лесен за реализиране и с очаквана приемлива точност е вариант *в*) фиг. 2.4., на базата на който по нататък се правят множество от изследванията от дисертационния труд. При него вместо отделен предавател се използват радиосигналите, излъчвани от БЛА, съдържащи на системни съобщения и/или видео поток. Тогава е необходима само приемна част на площадката за кацане. Посоченият вариант съществено намалява сложността на цялата система, липса от монтиране на допълнително оборудване на БЛА, не се увеличава теглото на летателния апарат, намалява се себестойността на системата.



 Предвателна част
 Приемпа част

 БЛА
 A<sub>2</sub>

 BTC
 BTC

 BTC
 BTC

Фиг.2.1 Разположение на БЛА в пространството в пространството спрямо центърът на сензорът на системата системата за безпилотно приземяване

Фиг.2.4. Блокова схема на системата за автоматично кацане на БЛА с ПКС, при използване на на САС с ПКС

# 2.1.1. Изисквания към предавателната част на системата за безпилотно приземяване на БЛА чрез ПКС.

В тази точка от дисертационният труд точка са разгледани основните изисквания към приемната част на системата за навигация чрез радиочестотна обработка и ПКС, изградена по вариант *в*). Мощността на предавателя трябва да бъде с достатъчно високо ниво на приетите сигнали за осигуряване на обхвата на действие и точността на системата за кацане. Спазени са няколко съображения, подробно описани в дисертационният труд като по съществените от тях са [162 - 164]. За реализация на системата е избрана честотата 2.4GHz, част от ISM свободен честотен диапазон. Честотата се използва масово в БЛА за осъществяване на управление и/или комуникация между дрона и стандартната му система за управление.

Изискване към предавателната антена, е да има ДНД да е насочена с определена широчина и форма. Ако приемната част оперира в ъглов обхват на  $\pm \Theta_{\theta}$  (фиг.2.1), то широчината на ДНД $\leq 2\Theta_{\theta}$ . и да бъде подходяща за монтаж на борда на БЛА.

# 2.1.2. Изисквания към приемната част на системата за безпилотно приземяване на БЛА чрез ПКС.

Приемната част трябва да осъществява функционалностите за определяне на местоположението на апарата в пространството спрямо координатната система на площадката за кацане (ПК), следене, филтрация и насочване към центъра на координатната система – центърът на площадката. В дисертационният труд подробно да разгледани изброените елементи съставящи приемната част на системата. След анализиране на 2.1.1 и 2.2.2, могат да бъдат определени основните технически параметри към системата за безпилотно приземяване на БЛА посредством ПКС разгледани[162-164]:

# 2.2. Определяне на относителното разстояние на опериране на системата за безпилотно приземяване на БЛА с псевдо конично сканиране.

В резултат на така дефинираната концепция на система за безпилотно приземяване на БЛА, посредством ПКС чрез радиочестотна обработка е необходимо грубо да се определи обхвата от разстояние на нейното опериране и да се оцени възможността за нейното практическо реализиране. Трябва да се изчисли енергийния бюджет на радиовръзката с така зададените параметри на радио комуникационната система и от там да се оцени максималното разстояние на покритие за безпилотно приземяване на БЛА.

Поради това, че се извършва груб анализ, за него се предлага да се използва опростен модел на загубите от разпространение в свободното пространство. В резултат се извежда уравнение (2.6), определящо максималното разстояние на покритие на системата. Замествайки в зависимостта дефинираните стойностите на параметрите на системата предложени в 2.1.2 се получава връзката между ъгъла  $\theta$  и височината, от която може да започне кацането, при различна чувствителност на приемника – фигура 2.7. Тук се определя граничния случай, при който БЛА е отклонен на ъгъл  $\theta$  от максимума на ДНД на  $\Phi$ АР – ъгълът, при който диаграмата намалява с – 3dB.



Фиг. 2.7. Връзка между височината от която може да започне процесът за безпилотно кацане на БЛА, спрямо ъгълът на отклонение на апарата, при съответна чувствителност на приемника



Фиг. 2.8. Височината от която може да започне процесът за безпилотно кацане на БЛА, при  $\theta = 20^{\circ}$  за различна чувствителност на приемника

#### 2.3. Изпълнени цели и задачи и изводи от втора глава:

- Разгледани са възможните варианти на реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством ПКС т.2.1. В зависимост от разположение на предаващата и приемната част на системата са дефинирани пет варианта. На всеки от тях е направен критичен анализ на приложимостта и функционалните възможности. Избран е най-приемливия вариант, при който предавателната част е разположена на БЛА, а приемната част се намира на ПК - фиг.2.4. Предложени са структурни схеми и са дефинирани функционалните изисквания от всеки елемент от тях. Същите по нататък се използват за разработване и изследване на средствата и алгоритмите за автоматично кацане с псевдо-конично сканиране. По отделно са разгледани компонентите на предаващата част и са определени изискванията към антенната система и честотния обхват на радиочестотното позициониране. Особено внимание е обърнато и на приемната част, която трябва да осъществява функционалностите за определяне на площадката за кацане (ПК), следене, филтрация и навигация към центъра на координатната система – центърът на площадката.
- За избрания вариант са определени основните технически параметри на всеки елемент от система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством ПКС -т.2.1. Техническите изисквания към приемната страна на системата основно се отнасят до параметрите на сензора на системата ФАР, чрез който се определят координатите на обекта. От неговите функционални възможности зависят функциите на системата като цяло. От гледна точка на простота на реализация и приемлива точност на позициониране са дефинирани минималния брой на лъчите за ПКС и изисквания към диаграмите на ФАР. От тази гледна точка е избрана конфигурация на ФАР с 2х2 пач елементарни излъчватели и и захранващата фидерна мрежа в микровълново изпълнение - т.2.1.3;
- Представена е методика за определяне на връзката между височината, от която може да започне процесът за безпилотно кацане на БЛА, спрямо ъгълът на ДНД на сензора – интегрираната антена в системата за приземяване, при различна чувствителност на приемника – т.2.3. Чрез нея грубо се определя максималното разстояние на опериране на системата. На основата на получените резултати може да се подбере чувствителността на приемника и те показват, че при така подбраните параметри на радио комуникационната система процесът на безпилотно приземяване на БЛА с псевдо конично сканира, чрез радио честотна обработка може да започне от приемлива височина и от енергийна гледна точка се доказва нейната реализуемост.

### ГЛАВА З. АНАЛИЗ И ПРОЕКТИАНЕ НА ФАР С ПКС ЗА БЕЗПИЛОТНО ПРИЗЕМЯВАНЕ НА БЛА

В настоящата глава са решени следните поставени цели и задачи на дисертационния труд:

- Проектирана, реализирана и изследвана е базова приемна част на системата за ПКС по избрания вариант от предишната глава. Представени са ДНД на базова ФАР за различните състояния на лъча, като по нататък същите се използват за разработване на подход и неговия математичен апарат за определяне на ъгловите координати на БЛА;
- Изследвани са различни варианти за подобряване на динамичният обхват на характеристиките на антенната система с псевдо-конично сканиране за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, чрез микровълнови периодични структури.

# **3.1.** Проектиране на сензор за системата с автоматично приземяване на БЛА с ПКС.

За да бъдат спазени всички дефинирани изисквания към сензора -  $\Phi$ AP за реализиране на площадка за безпилотно приземяване на БЛА е необходимо да се избере подходяща антенна система. За спазване на техническите изисквания, дефинирани в 2.1.2 и осигуряване на компактност на системата е избрано да се проектира кръгово поляризирана микровълнова антенна решетка с тип на конструкцията на AP е 2х2, Поради разположението на сензора успоредно спрямо земната повърхност отместването на ДНД на антената се осъществява по равнините на  $\phi$  и  $\Theta$ . [164].



Фиг.3.13. Снимка на реализирана приемна страна на системата за безпилотно приземяване на БЛА с ПКС

Състояние на ДНД	Усилване [dBi]	Широчина на ДНД	Отместване на ДНД
		[deg]	[deg]
състояние 1	7.4	48°	-
състояние 2	7.4	47°	-20°
състояние 3	7.4	48°	20°
състояние 4	7.4	47°	-20°
състояние 5	7.4	48°	20°
състояние 6	6.2	46°	-16°
състояние 7	6.4	48°	16°
състояние 8	6.2	46°	-16°
състояние 9	6.2	46°	16°

### Таблица 3.4. Измерени ДНД на проектираната ФАР

Поради използването на закъснителни линии за дефазиране, S11 параметрите са приблизително равни за съседните състояния, което осигурява добра работа на антената за централната честота, със задоволителна широчина на честотната лента BW ≥ 50MHz.

## 3.3. Методи и средства за подобряване на характеристиките на САС към системата за безпилотно приземяване на БЛА с ПКС.

В литературния обзор е обърнато внимание на съществуващите типове периодични структури и начин им на интегриране в антени от различен тип с цел подобряване на качествените им показатели. В дисертационният труд са разгледани множество периодични структури: **PBG\_Структура\_0**, **PBG\_Структура\_1**, **EBG\_Структура** 0, **EBG\_Структура** 3, ЕВG\_Структура 2, **ЕВ** Структура 4, **ЕВG** Структура 1, **ΓΟ EBG Structure 3 ΓO EBG Structure 1**, **ΓO EBG Structure 2**, И **ГО EBG Structure 4** за подобряване динамичният обхват на сензора. В автореферата са представени само някой от тях.

#### 3.3.1. Изследване на фотонна периодична структура

Модифицирайки разгледаната методика в 1.4.3 всеки слой от структурата трябва да има електрическа дължина  $\boldsymbol{\Phi} d_{I,...}, \boldsymbol{\Phi} d_{N-I} = 90^{\circ}$ . Зависимостите определящи дебелината на слоевете диелектрик и въздух се определя от :

$$d_{k} = h_{air} = \frac{c}{4f_{0}} = \frac{\lambda}{4}$$

$$(3.11).$$

$$d_{k} = h_{dielectric} = \frac{c}{4f_{0}\sqrt{\varepsilon_{r}}} = \frac{\lambda_{g}}{4}$$

$$(3.12).$$

$$PBG$$

$$PBG$$

$$d_{k} = h_{dielectric} = \frac{c}{4f_{0}\sqrt{\varepsilon_{r}}} = \frac{\lambda_{g}}{4}$$

$$(3.12).$$

Фиг.3.13 Разпределение на сегментите на разглежданата фотонна структура спрямо антена

За проектираната структура се приема, че първият и последният елемент на фотонния кристал е диелектрик с  $\varepsilon_{rl,..,N-1} > 1$ . Важно е да се отбележи, че в тази глава е направено изследване и поставено изискване към честотните параметри за периодичната структура. Чрез използването на методът на оптимизация, разгледан в [130] се получава коефициента на предаване Tr и коефициента на отражение Rr на изследваната структура. Техните стойности зависят от ъгъла на елевация - ъгълът на падане на вълната с дясна поляризация, фиг. 3.15. Съответно S11 и S21 са еквивалентни на Tr и Rr.

За да се изследва влиянието на оптималната **PBG\_Структура\_1** върху коефициента на усилване и ДНД и да се потвърдят получените резултати е проектирана друг хибридна антена комбинираща, конструкцията на пач антена с Уда-Яги антена [166, 168] – таб. 3.6.

	Усилване [dB]	Широчина на ДНД вЕ-равнината [deg]
Пач антена без PBG	8.8	50
Пач антена със PBG	11.9	42
Пач-яги антена без PBG	13.5	40
Пач-яги антена с PBG	15.4	30

Таб.3.6 Сравнение на измерените ДНД с и без фотонна структура

### 3.3.2. Z-образна EBG периодична структура

Представеният анализът в настоящата точка на дисертационния труд използва модифицирана версия на разгледаната в литературният обзор Z-образна периодична структура. На фиг.3.43 е показана изработената EBG\_Структура\_3, като са представени

нейните честотни параметри и промяната на усилването на антената при поставяне на структурата на различно разстояние пред нея [171]. Фигури 3.49-3.53 показват сравнение на измерените ДНД на ФАР без интегрирана и с интегрирана Z-образна EBG структура.



Фиг. 3.43 Изработената **EBG\_Структура\_3**, нейните S параметри и изменението на усилването при промяна на разстоянието между антената и структурата



Фиг. 3.49. Сравнение на измерените ДНД на централното състояние с и без **EBG\_Структура\_3** 



Фиг. 2.50 Измерени ДНД на състояния 2 и 4 с и без ЕВС Структура 3



**ЕВ** Структура 3



Фиг. 3.51 Измерени ДНД на състояния 3 и 5с и без ЕВС Структура 3



Фиг. 3.53 Измерени ДНД на състояния 3 и 5с и без ЕВG Структура 3

Състояние на ДНД	Усилване без ЕВС структура [dBi]	Усилване с EBG структура [dBi]	Широчина на ДНД без ЕВG структура [deg]	Широчина на ДНД с EBG структура [deg]	Отклонение на ДНД от главния минимум без EBG [deg]	Отклонение на ДНД от главния минимум с EBG [deg]
Състояние 1	7.4	9.4	48°	37°	-	-
Състояние 2	7.4	8.6	46°	40°	-20°	-16°
Състояние 3	7.4	8.5	48°	39°	20°	14º
Състояние 4	7.4	8.5	47°	34°	-20°	-12°
Състояние 5	7.4	8.4	48°	35°	20°	16°
Състояние 6	6	8.1	46°	34°	-16°	-10°
Състояние 7	6.3	8	48°	34°	12°	8°
Състояние 8	6	8.3	46°	38°	-16°	-10°
Състояние 9	6.3	8.2	46°	36°	12°	8°

Таб.3.10. Сравнение между измерените ДНД с и без ЕВG\_Структура\_3

Както се вижда от сравнението между симулираните и измерени резултати от Таб. 3.10, лентовата структура подобрява параметрите на ДНД. Забелязва се значително свиване на широчината на основния лист на ДНД за различните състояния, както и увеличавате на усилването на антената. Поради несиметричната топология на Z-образната метализирана повърхност в този тип структури, се наблюдава липса на симетрия в съседните състояния на ДНД.

#### 3.3.3.2. Интегриране на Гъбообразна периодична структура във ФАР с ПКС.

От представеното изследвания в 3.3.2.1 се забелязва, че поради не симетрия в съседните състояния на ДНД, породени от не симетрия в топологията на Z-образната структура, което я прави неподходяща за радиолокационни цели. Гъбообразната периодична структура разгледана в 1.3.4 има симетрична топология, затова се предлага и изследва интегрирането на модифицирана гъбообразна структура фиг. 3.54, чийто геометрични размери се определят чрез следните зависимости [169]:



Фиг.3.54 Модифицираната Гъбообразна EBG, а) – изглед отгоре; б) – страничен изглед;

В дисертационният труд подробно е разгледано проектирането и интегрирането в конструкцията на ФАР на четири гъбообразни ЕВG структури с различна диелектрична проницаемост - таб. 3.11. Най добро подобряване на ДНД на ФАР, се забелязва при интегриране на ГО\_EBG\_Structure\_1 – Таб. 3.12.

Гъбо-образна ЕВG структура	Диелектрична подложка	W [mm]	g [mm]	Брой на пачовете
<b>ΓO_EBG_Structure_1</b>	FR4 ( $\varepsilon_r = 4.4$ )	31.25	15.625	16
<b>ΓO_EBG_Structure_2</b>	Rogers RO4003 ( $\epsilon_{r} = 3.55$ )	31.25	13.88	20
<b>ΓO_EBG_Structure_3</b>	Rogers RT/duroid 5870 ( $\epsilon_r =$	31.25	11.364	20
	2.33)			
<b>ΓO_EBG_Structure_4</b>	Rogers TMM 6 ( $\varepsilon_r = 6$ )	31.25	20.83	20

Таблица.3.11 Параметри на изследваните ГОЕВС структури

Таблица 3.12. Сравнение на радиационните характеристики на ФАР при интегрирането на **ГОЕВG\_1** структури

структура	ДНДсъстояние	Усилване с/без ГОЕВG [dBi]	Широчина на ДНД с/без ГОЕВБ [deg]	Отместване на ДНД с/без ГОЕВС [deg]
ΓOEBG_1	състояние 1	7.4/9.7	55.6°/40.24°	-
	състояние 2	7.4/9.1	54.1°/40.7°	19.7º/10.4º
	състояние 3	7.4/8.9	53.5°/40.4°	24.2°/15.1°
	състояние 4	7.4/9.1	53.9°/41.0°	-19.7º/-10.9º
	състояние 5	7.4/8.9	53.5°/40°	-23.9°/-15.2°
	състояние 6	7.4/8.8	53.9°/43.4°	17.4°/13°
	състояние 7	7.4/8.9	54.1°/41.9 °	-18.1º/13.3º
	състояние 8	7.4/8.8	34.7º/42.1 º	18.8°/12.8°
	състояние 9	7.4/8.9	53.7°/42°	-17.9°/-13.2°

### 3.3.4. Кръгово поляризирана ФАР съставена от линейно поляризирани квази Яги антенни с интегриране на PBG структура:

Изследвано е въздействието на PBG структура върху радиационните параметрите на квази-Яги антена. Проектирани, реализирани и са измерени параметрите на три прототипа антени: конвенционална квази-Яги антена, квази-Яги с множество директори и квази-Яги антена с интегрирана PBG периодична структури. В дисертационния труд са представени данни от измерванията на ДНД на отделните антени. [169].



Фиг. 3.71. Изработените прототипи на квази-Яги антените



Фиг. 3.72. S11 параметрите на проектираните квази-Яги антени

Таб.3.15. Сравнение между ДНД на ФАР състоящо се от квази-Яги-та и квази-Яги -та с интегрирана РВG Структура в тяхната топология.

Състояние на ДНД	Усилване на ФАР от квази-Яги антена [dBi]	Усилване на ФАР от квази-Яги антена с PBG [dBi]	Широчина на ДНД на ФАР от квази-Яги антена [deg]	Широчина на квази- Яги ФАР с интегрирани PBG [deg]	Отклонение на ДНД от главния на ФАР от квази-Яги антена [deg]	Отклонение на ДНД от главния на ФАР от квази-Яги ФАР с PBG[deg]
Състояние 1	8	10.3	44°	34°	-	-
Състояние 2	8	10.3	43°	33°	-17°	-14º
Състояние 3	8	10.3	44°	33°	17°	14°
Състояние 4	8	10.3	42°	34°	-17º	-14º
Състояние 5	8	10.3	43°	33°	17°	14°
Състояние б	7.8	9.8	42°	34°	-15.4°	-12°
Състояние 7	7.8	9.8	41°	35°	15.3°	12°
Състояние 8	7.9	9.8	42°	34°	-15.4°	-12°
Състояние 9	7.8	9.8	43°	35°	15.5°	12°

#### 3.4. Изпълнени цели, задачи и изводи от трета глава:

-На основата дефинираните технически изисквания и функционални възможности, с известни методики е проектирана и реализирана базова приемна част на системата по избрания вариант. Проектирани, реализирани, измерени и са анализирани: базова ФАР с 2x2 пач елементарни излъчватели за ПКС и приемната част за радиочестотна обработка системата. Избран е вариант, при който координатите на ъгловото отклонение на обекта се определят от измерените мощности на приетия сигнал от всеки лъч на ПКС. Целта е реализирането системата като цяло и изследване на предложените средства и алгоритми за автоматично позициониране. Представени са ДНД на базова ФАР за различните състояния на лъча, като по нататък същите се използват за разработване на подход и неговия математичен апарат за определяне на ъгловите координати на БЛА;

- Предложена е блокова схема на приемник Фиг.3.12, като са определени функционалните изисквания и параметри на основните му елементи: за първична обработка на приетия радиочестотен сигнал, управление на ДНД на ФАР, измерване на приетата мощност. Същият е реализиран с конвенционални елементи и се използва като основно средство за тестване на предложените алгоритми за автоматично кацане и псевдоконично сканиране;
- В резултат на поставената цел: подобряване на динамичния обхват на сензора за псевдоконично сканиране – ФАР, са изследвани различни периодични структури. Изследван е подхода, при който перодичната структура се поставя пред излъчващата апертура на ФАР. Изследвани са: фотонни периодични структура тип огледало на Брейк: PBG\_Структура\_0, PBG\_Структура\_1, Z-образни EBG периодични структури: EBG\_Структура\_0, EBG\_Структура\_1, EBG\_Структура\_3, EBG\_Структура\_4; модифицирана гъбообразна EBG: ГО\_EBG\_ Структура \_1, ГО\_EBG\_ Структура\_2, ГО\_EBG\_Структура \_3, ГО\_EBG\_Структура\_4. Всички структури са проектирани, оптимизирани и реализирани;

- След поставяне на периодична структура пред излъчващата повърхност на ФАР симулационно и чрез измерване са определени и потвърдени оптималните разстояния, при които ДНД на изследваната система има максимум. Симулационно и чрез измерване са изследвани и сравнени радиационните диаграмите на следните варианти на антени с PBG и EGB структури:
  - о Пач антена и пач-Яги антена с и без оптимизирана PBG\_Структура\_1. От Фиг.3.23, Фиг.3.24, Фиг.3.25, Фиг.3.26 се вижда, че при използване на предложената структура, коефициентът на усилване на антената се увеличава почти с 3dB, а широчината на ДНД се свива с близо 10 градуса, което прави структура подходяща за повишаване динамичният обхват на работа на сензора за безпилотно приземяване на БЛА;
  - Пач антена с и без EBG\_Структура\_1, EBG\_Структура\_2. Симулационните и измерени резултати на ДНД на антенната система, съставена от пач антена и EBG\_Структура\_1,2 са представени на фигури 3.39 ÷ 3.42, таблици 3.37 и 3.38. Когато разстоянието между EBG\_Структура\_1/ EBG\_Структура\_2 и антената е оптимално, усилването се увеличава с 2dB и ширината на ДНД се стеснява приблизително с 20°;
  - О След направените изследвания на РВG и ЕВG структурите се вижда, че и при двете структури се наблюдава почти еднакво подобряване на радиационните характеристики на антената. за реализиране на сензора за навигация и/или приземяване на БЛА по подходяща е ЕВG структурата поради по малките и размери. Фотонната структура пък е по подходяща за имплементиране и подобряване на характеристиките на квази-Яги антени, където чисто технологично фотонната структура може да е част от топологията на антената.
  - ФАР 2х2 Пач елементи с и без EBG\_Структура\_3. На база на EBG\_Структура\_1 и EBG\_Структура\_2 са разработени, EBG\_Структура\_3 и EBG\_Структура\_4, подходящи за интегриране във ФАР за безпилотно приземяване. Както се вижда от сравнението между симулираните и измерените резултати за ДНД на ФАР с интегрирана EBG структура и без такава пред излъчващата повърхност на антената (таблица 3.10, фиг.3.49-3.53), лентовата структура има подобряващи параметри върху ДНД. Забелязва се свиване на широчината на основния лист на ДНД в различните състояния с 8°-15°, както и увеличавате на усилването на антената с не по-малко от 2dB. Поради несиметричната топология на Z-образната метализирана повърхност в този тип структури, се наблюдава липса на симетрия в съседните състояния на ДНД.
  - ФАР 2х2 Пач елементи с и без гъбо-образна ЕВG 1,2,3,4. Фигури 3.59-3.69 изследват влиянието на диелектричната константа на ЕВG структурата върху ДНД и усилването на антената. Фигура 3.59 показва, че максимума на коефициента на усилване на антената в функция от разстоянието между натената и ЕВG независи от диелектричната проницаемост на подложката. Най голям коефициент на усилване на антената се постига при разстояние равно на 1.6λ. Останалите фигури и таблици 3.12 3.15 демонстрират свиването на ДНД и увеличаване на усилването при всички структури с различна диелектрична проницаемост. Структурата осигурява симетрия между отделните състояние на ДНД в режим на сканиране, единствен недостатък на структурата е липса на еднакво ниво на усилване в различните състояния на ДНД.
  - Друг тип кръгово поляризирани ФАР, съставени от линейно поляризирани квази яги антенни с интегриране на PBG структура:
    - Квази-Яги с един директор с и без PBG структура;
    - За сравнение квази-Яги с 5 директора.

### ГЛАВА 4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ФАР С ПСЕВДО КОНИЧНО СКАНИРАНЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЪГЛОВИТЕ КООРДИНАТИ НА БЛА

В настоящата глава са представени решения на следните поставени цели и задачи на дисертационния труд:

- Предложен е подход за определяне на ъгловите координати на БЛА чрез ФАР с псевдоконично сканиране, чрез обработка на мощността на приетия сигнал. Основната цел е подходът да дава възможност за опростена реализация на системата и да има необходимата точност за безпилотно кацане на БЛА.
- Изведени са математически зависимости, които позволяват определянето на директната зависимост на ъгловите координати на обекта, чрез измерените мощности от псевдоконично сканиране.
- С оглед приложимостта на предложения подход е изследва и оценена систематичната и случайната грешка за позициониране – грешките за определяне на ъгловите координати, с различни конфигурации и структури на ΦАР с псевдоконично сканиране.

# 4.1. Подход за определяне на ъгловите координати на БЛА чрез ФАР с псевдоконично сканиране.

Към тази глава в дисертационния труд е представена оценката на приложимостта на ФАР и ФАР с интегрирани различни структури, като основен сензор за псевдоконично сканиране и безпилотно кацане на БЛА и да се избере подход за определяне на ъгловите координати на обекта.

Използва се Гаусова апроксимация на ДНД на сензора и последваща линейна апроксимация на разликовите диаграми [162]:

$$F_2(\phi, \theta) - F_4(\phi, \theta) = 4 \log_{10} 2 \cdot \frac{\phi_{02}}{\gamma^2} \cdot \phi \text{ [dB]},$$
 (4.3 a)

$$F_3(\phi, \Theta) - F_1(\phi, \Theta) = 4log_{10}2.\frac{\phi_{03}}{\gamma^2}.\Theta \text{ [dB]}$$
(4.3 6).

Зависимости 4.3 а) и 4.3 б) описват две равнини, на които проекциите им на нормалните им вектори върху ъгловата координатна система са ортогонални и самите нормални вектори са ортогонални. Освен това отместването на двете равнини спрямо центъра на координатната система е равно на нула. Те показват, че лесно могат да бъдат изчислени ъгловите координати на обекта на основата на измерените мощности в логаритмичен мащаб. За тази цел (4.3 б) и 4.3 б))) се трансформира в[162]:

$$P_{2}(\phi, \theta) - P_{4}(\phi, \theta) = F_{2}(\phi, \theta) - F_{4}(\phi, \theta) \text{ [dB]}(4.4 \text{ a}),$$
  

$$P_{3}(\phi, \theta) - P_{1}(\phi, \theta) = F_{3}(\phi, \theta) - F_{1}(\phi, \theta) \text{ [dB]}(4.4 \text{ 6}),$$

защото за всяко і приетата мощност е

$$P_i(\phi, \theta) = P_0 + F_i(\phi, \theta) \text{ [dBm]}$$
(4.5)

Мощността постъпваща в апертурата на антената  $P_0$  [dBm] е една и съща.

Необходимо е да се отбележи, че тогава сензорът ще има систематична грешка поради:

- Грешка от Гаусовата апроксимации диаграмите не са Гаусови функции;
- Има наличие на странички листа;
- Не са изпълнени строго изискванията към антената от Таблица 2.1;
- Широчините на диаграмите могат да бъдат различни в двете равнини на φ и Θ, а също и за отделните лъчи;

• Квадратурен дисбаланс заради това, че проекциите на нормалите на апроксимиращите равнини като (4.3 a)), (4.3 б)), не са ортогонални.

# 4.1.1. Апроксимация на разликовите диаграми на ФАР без периодични структури

Към тази точка са представено изследване на база от измерените и/или симулираните ДНД на ФАР. Изследвани са разликовите диаграма  $F_R$  -  $F_L$  отчита изменението на  $\phi$ , а  $F_F$  -  $F_B$  на  $\theta$  и индексите им са съгласно таб.2.1. Апроксимиращите равнини лесно се описват математически и уравненията им могат да се използват за бързо изчисление на ъгловите координати.

Поради това, че числовите стойности на диаграмите са известни, уравненията на равнините могат да се определят чрез регресионен анализ. Фигурите показват, че разликовите характеристики са линейни функции относно ъгловите координати на БЛА в областите около центъра на сензора. Освен това, както беше показано, сензорът захваща и следи подвижния обект в ъгловия обхват на  $\Theta_0 = \pm 20^\circ$ . Затова регресията на разликовите диаграми е ограничена в посочения ъглов обхват. След което е направена линейна регресия на получените резултати.

Уравненията на апроксимираните равнини се представят по следния начин:

$$\begin{vmatrix} Ap_{\phi} = a. \phi + b. \theta + o_{\phi} \\ Ap_{\theta} = c. \phi + d. \theta + o_{\theta} \end{aligned}$$
(4.6)

В резултат на апроксимацията са получени следните коефициенти от апроксимацията на разликовите диаграми на симулираната ФАР: a=0.9702; b=0.0907; c=0.0503; d=0.9351 за и тази с измерени диаграми: a=0.9002; b=0.1007; c=0.0403; d=0.9351. Поради това, че антената е центрирана спрямо нейното координатно начало, отместванията  $o_{\theta} = o_{\phi} = 0$ . Центрирането се извършва в процеса на измерване на антената. Вижда се, че коефициентите b и c са различни от нула, което означава, че ще има квадратурен дисбаланс. Това е така защото диаграмите на изработената антена се отклоняват от изискванията в Подходящо е да реши горната система уравнения спрямо ъгловите координати чрез обратна матрица или последователно с:

$$\Theta_s = (Ap_{\theta} - \frac{c}{a}Ap_{\phi})/D, \phi_s = (Ap_{\phi} - b\Theta_s)/a \quad D = d - b\frac{c}{a}$$
(4.7)

Използването на апроксимиращи равнини на разликовите диаграми за оценка на ъгловите координати е подход, който предполага малка изчислителна сложност на алгоритъма за оценка. Измерените диаграми и разликовите им характеристики обаче не са линейни в целия ъглов обхват на ФАР. Затова е необходимо да се оцени систематичната грешка за позициониране.

# 4.2. Оценка систематичната грешка на сензора чрез абсолютната грешката от позициониране

Диаграмите на сензора не се апроксимират точно с Гасува функция и се вижда, че разликовите характеристики не са линейни в целия ъглов обхват на ФАР. Систематичната грешка на сензора може да се определи чрез абсолютната грешка на ъгловите координати. Абсолютната грешка се изчислява, като разлика между действителните ъглови координати на БЛА  $\phi$ ,  $\theta$  и координатите  $\phi_s$  и  $\theta_s$ , определени с горния подход.

## 4.2.5. Анализ на получени резултати от изследване на грешката на различните варианти за реализация на сензора.

В част 4.2 бяха изследвани абсолютните грешки на позициониране при линейна апроксимация на разликовите диаграми на следните сензори:

- 1. ФАР 2х2 с пач елементарен излъчвател и кръгова поляризация симулирани и измерени разликови диаграми;
- 2. ФАР 2х2 с интегрирана гъбообразна ЕВС структура симулирани разликови диаграми;
- 3. ФАР 2х2 с интегрирана Z-образнаЕВС структура симулирани разликови диаграми;
- 4. ФАР 2х2 с Квази-Яги антени и интегрирана фотонна структура в топологията на елементарният излъчвател симулирани разликови диаграми;

За да може да бъде направено сравнение на приложимостта на подхода и систематичната грешка от позициониране на различните възможни структури на сензора в Таблица 4.1 са обобщение максималните грешки от позициониране при:

- *φ*=0, *θ*=0 БЛА е в центъра на координатната система на ФАР площадката за кацане;
- $\Delta \phi$ ,  $\Delta \theta$  ъглови грешки в обхвата на сензора  $\Theta_0 = \pm 20^\circ$ ;
- $\Delta \phi$ ,  $\Delta \theta$  ъглови грешки в обхвата на сензора  $\Theta_0 = \pm 15^\circ$ ;
- преизчисленото декартово отклонение в [m] по двете оси  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  за височина на БЛА h=1m над площадката за кацане.

1	1 1	1			
$\phi$ , $ heta$ [deg]	$\Delta \phi$ , $\Delta  heta$ [deg]	$\Delta x$ , $\Delta y$ [m], $h=1$ m			
ФАР 2x2 с пач елементарен излъчвател и кръгова поляризация – симулирани разликови диаграми					
0°,0°	$0.00^{\circ}, 0.00^{\circ}$	0.000, 0.000			
от -20 до 20°, от 20° до -20°	max 3.6°, max 4.7°	0.5798, 0.5815			
от -15 до 15°, от 15° до -15	max 2.5°, max 3.5°	0.01487, 0.02611			
ФАР 2x2 с пач елементарен і	излъчвател и кръгова поляризация – и	измерени разликови диаграми			
0°,0°	0.11°, 0.12°	0.0019,0.0021			
от -20 до 20°, от 20° до -20°	max 8°, max 5.8°	0.14, 0.10			
от -15 до 15°, от 15° до -15	max 2°, max 2°	0.035, 0.035			
ФАР 2x2 с интегрирана г	ьбообразна EBG структура – симулі	ирани разликови диаграми			
0°,0°	$0.00^{\circ}, 0.00^{\circ}$	0.000, 0.000			
от -20 до 20°, от 20° до -20°	max 3.2°, max 5.2°	0.5736, 0.5747			
от -15 до 15°, от 15° до -15	max 2°, max 4°	0.4092, 0.4097			
ФАР 2x2 с интегрирана .	Z-образна EBG структура – симули	рани разликови диаграми			
0°,0°	$0.00^{\circ}, 0.00^{\circ}$	0.000, 0.000			
от -20 до 20°, от 20° до -20°	max 4.1°, max 6.8°	0.63, 0.6315			
от -15 до 15°, от 15° до -15	max 2°, max 5°	0.4477, 0.4484			
ФАР2х2 с Квази-Яги антени и интегрирана фотонна структура в топологията на елементарният					
излъчвател – симулирани разликови диаграми					
0°,0°	$0.00^{\circ}, 0.00^{\circ}$	0.000, 0.000			
от -20 до 20°, от 20° до -20°	max 7°, max 7°	0.8673, 0.873			
от -15 до 15°, от 15° до -15	max 9°, max 5°	0.8651, 0.8708			

Таблица 4.1. Абсолютна грешка от апроксимация за различните сензори

В обобщение на извършената работа в четвърта глава могат да бъдат направени следните изводи:

- 1. Предложеният подход на апроксимиране и определяне на ъгловите координати чрез разликовите диаграми на ФАР има необходимата точност;
- 2. Оценяването на грешката от позициониране е възможно да бъде направена, както само от измерени или само от симулирани диаграми на ФАР разликата получена, чрез симулирани и измерени ДНД на ФАР е пренеблежима;
- 3. В случая на ФАР с интегрирана гъбообразна ЕВС структура грешките на ъгловите координати при сензор с ЕВС и без структура пред антената имат същия порядък от стойности – т.е. не се подобрява грешката от позициониране. Но за сметка на това коефициентът на усилване на антената с ЕВС е по голям с 2 dB за главният лъч и с 1.4 dB за страничните състояния на ДНД спрямо тази

без EBG спрямо тази с EBG. Колкото е по голям коефициента на усилване на антената толкова е по голямо разстоянието на опериране на системата за кацане. Това е видно от бюджета на радиовръзката, направен в глава 2. Друго важно съображение е, че при по голямо усилване, случайната грешка от определяне на координатите ще бъде по малка. Тя зависи от случайната грешка от измерване на мощността за всеки отделен лъч на сензора.

- 4. При ФАР с интегрирана интегрирана Z-образна EBG структура изводите са същите както в т. 2. Грешките на ъгловите координати при сензор с EBG и без структура пред антената имат същия порядък от стойности т.е. не се намалява грешката от позициониране. Но за сметка на това коефициентът на усилване на антената с EBG е по голямо с 2dB за главният лъч и с 1 dB за страничните състояния на ДНД спрямо тази без EBG;
- 5. При ФАР с квази-Яги антени и интегрирана фотонна структура в топологията на елементарният излъчвател, изводите са същите както в т. 4.
- 6. ФАР с подобрени параметри, посредством изследваните в глава 3 периодични структури са приложими в система за автоматично приземяване на БЛА, чрез радиочестотна обработка, посредством псевдо конично сканиране.

4.3. Оценка на ъгловото разстояние и позициониране на БЛА спрямо площадката за приземяване.

Както беше отбелязано в 4.2.5., получените резултати от анализа на грешката на позициониране на БЛА спрямо на центъра на ФАР без периодична структура са напълно достатъчно за изследване на пълната функционалност на системата. По нататък е направена оценката на ъгловото разстояние при позициониране на БЛА спрямо площадката за приземяване.

В таблица 4.1 е обърнато внимание на конкретни стойности и интервали на изменение на абсолютната грешка. Резултатите показват, че грешката и за двете координати е не по голяма от  $\pm 2^{\circ}$  при отместване на позиционирания обект спрямо центъра на сензора  $\pm 15^{\circ}$ . В центъра на сензора тя не е по голяма от  $0.15^{\circ}$ , което при височина на апарата над площадката за кацане от h=1m дава отклонение няколко милиметра. Грешката намалява с приближаване на обекта до центъра на сензора. Този факт е важен, защото показва приложимостта на подхода и ще гарантира сходимост на алгоритъма за кацане.



Фиг.4.31. Оценено ъглово разстояние  $R_s$  във функция от действителните ъглови координати



Фиг.4.32 Грешката от позициониране, като са съпоставени окръжностите на действителното ъглово разстояние

и кривите определени с използване на предложената регресия.

## 4.4. Статистическа оценка на влиянието на шума от измерване на мощността при оценката координатите на БЛА

Освен систематичната грешка от позициониране на сензора е необходимо да се оцени и случайната грешка. Тя основно се влияе от случайния характер на изменение на приетата мощност от различните лъчи на ФАР при псевдо коничното сканиране. Оценката е необходима за да се докаже приложимостта на псевдо коничното сканиране при

минимален брой диаграми на ФАР и за входни параметри при настройката на евентуална Калманова филтрация.

Резултатите са получени като се използва реализираната приемна страна на системата за безпилотно приземяване на БЛА с ПКС. След статистическа обработка може да се определи влиянието на случайната грешка от измерване на мощността и резултатите са дадени на фигури 4.34 а) и б). Фиг. 4.34. а) обединява измерените мощности P за различни разстояния с различни състояния на диаграмата на ФАР спрямо средната и стойност  $\Delta P = P$ -mean(P) [162].



Фигура 4.34. a) Абсолютно отклонение, стандартно отклонение на измерената мощност и 95% интервал на прогнозиране за новото измерване. (б) Стандартно отклонение на измерената мощност и нейната полиномна апроксимация.

На същата фигура са показани стандартното отклонение (standard deviation) във функция от измерената мощност (разстоянието) и прогнозния интервал (prediction interval) с 95% вероятност за попадане на всяка нова измерена стойност на мощността. Фигура б) представя оцененото стандартно отклонение на мощността на приетия сигнал от множеството измервания в зависимост средна мощност. В допълнение е намерена апроксимиращата функция чрез регресионен анализ в МАТЛАБ с използване на полином от 3-та степен и графиката е дадена на същата фигура с непрекъсната линия. Определената апроксимираща функция има вида:

 $std_{Pm}[dB] = -0,0001233.Pm^3 - 0,01494.Pm^2 - 0,603.Pm - 8$  (4.8). -Pm е средната измерена мощност в [dBm].

Тук могат да бъдат направени следните изводи:

- Стандартното отклонение се увеличава с намаляване на приетата мощност, респективно с увеличаване на разстоянието. До -45 dBm то не се променя и е от порядъка на 0.11 dB. На малки разстояния грешката се определя преди всичко от шума от квантуване, шум от превключване на диаграмата, белия топлинен шум и коефициента на шума на приемника;
- При по големи разстояния се проявяват ефектите от много лъчево разпространение и Райсов фадинг и затова се наблюдава увеличаване на стандартното отклонение. Причините за това са и, че диаграмите на ФАР имат странични листа;
- Оценката на доверителния интервал с 95% вероятност за попадане на отклонението на приетата мощност дефинира случайната абсолютна грешка. За малко разстояние (голяма стойност на мощността) тя е ±0.21dB, а за малки мощности тя е ±0.37dB. Стойността трансформирана с (4.3) в ъглово отклонение е ±0.41°. Или за разстояние 6m отклонение е от 4mm на координатите на обекта, а за 1 m отклонението е 7mm. На 40m интервалът е ±0.86dB, което дава отклонение на координатите от центъра 0.4mm.

Оценените систематични грешки показват, че случайната грешка е приемлива за практическата приложимост на предложената система с псевдоконично сканиране и радиочестотна обработка. Оценените абсолютни и случайни грешки могат да се използват при определяне параметрите на Калмановия филтър.

### ГЛАВА 5. АЛГОРИТМИ ЗА АВТОМАТИЧНО КАЦАНЕ И НАВИГАЦИЯ НА БЛА С ПКС И РАДИОЧЕСТОТНА ОБРАБОТКА

В настоящата глава са решени следните поставени цели и задачи на дисертационния труд:

 Разработване, изследване и определяне ограничителните условия и функционалните възможности на алгоритми за автоматично кацане и следене на БЛА, използващи разработения подход за определяне на ъгловите координати на обекта.

## 5.1. Алгоритъм за автоматично кацане с предложената обработка на сигналите и информацията [162].

В основата на алгоритьма е, че местоположението на летателния апарат се определя с оценените ъглови отклонения  $\phi_S$ ,  $\Theta_S$  и текущата височина на апарата z = h. БЛА се насочва към площадката за кацане чрез заложените налични средства и алгоритми за навигация и позициониране, обикновено се използва GPS. След като БЛА попадне в обхвата на действие на системата с ПКС, започва работа на алгоритъма за автоматично кацане. Всяка позиция k на БЛА се определя от координатите  $\phi_k$ ,  $\Theta_k$ ,  $z_k = h_k$ . Текущата височина  $h_k$  е входен параметър. На всяка стъпка от процеса на кацане алгоритъмът коригира местоположението на апарата в равнина (x0y) и намалява абсолютната височина със стъпка  $z_{k+1}=h_k+\Delta h$ . Промяната на височината определя скоростта на кацане и се избира опитно. Приемливи стойности на  $\Delta h=0.5m$  do 2m в зависимост от текущата височина  $h_k$  [162]

Блоковата схема на предложения алгоритъм е представена на фигура 5.1. Основните стъпки на алгоритъма са описани в [162].



Фиг. 5.1. Блокова схема на алгоритъмът за автоматично кацане на БЛА

# 5.1.1 Определяне работната височина на работата на системата за позициониране.

Алгоритъмът за позициониране започва своята работа след като БЛА попадне в ъгловия обхват на системата  $\pm \theta_0$  при начална височина  $h_0$ . Минималната височина, от която започва работата на алгоритъма, се ограничава от точността на вградената навигационна система. Ако се използва GPS навигация при максимална неопределеност на позициониране от  $\nabla_{x,y} = 6$  m за да попадне БЛА в зоната на сензора минималната височина не трябва да е по малка от  $h_{0min} = 16.5m$  - формула (2.2). Това е ограничение на височината  $h_0$  от долу.

Определяне работната височина без първоначално позициониране с GPS

Целесъобразно е да се приеме  $\theta = \theta_0$ , защото тогава разстоянието между двете антени на системата ще бъде максимално и бюджетът ще се гарантира за най-тежкия

случай. При зададена чувствителност на приемника и останалите параметри от условието (5.8) се определя максималната височина  $h_{0max}$ , от която може да започне работата на алгоритъма за кацане. Следователно:

$$\boldsymbol{h_{0max}}[m] = \cos(\theta_0) \cdot 10^{P_T - S_{RX} - 20.lg(fc) - 20.log 10\left(\frac{4\pi}{c}\right) + G - Pd/2)/20}$$
(5.8)

Резултатите, дадени на Фигура 5.4 се отнасят за начална височина ho=15m. Фигура 5.4 а) илюстрира процеса на кацане спрямо 3D координатната система на площадката за кацане, а Фигура 5.4 б) показва статистиката на координатите на оценената позиция а края на алгоритъма – hmin=1m над сензора. Стандартното отклонение е от порядъка на 0.7сm или точността на позициониране във финалния етап е напълно задоволителна.



фиг.5.3а Максимална височина на позициониране при  $\theta_0 = 20^\circ$ 

фиг.5.36. Максимална височина на позициониране при  $\nabla_{xy} = 6m$ 

#### Определяне работната височина при първоначално позициониране с GPS

Алгоритъмът за кацане започва своята работа при условие, че БЛА първоначално е позициониран над площадката за кацане с помощта на спътникова навигационна система. Формула 2.2 определя минималната височина  $h_{0min}$  от която сработва алгоритъма. В горното изследване (фиг.5.3а) максималната височина е определена за случая, в който БЛА има ъглово отклонение, равно на обхвата на работа на сензора  $\theta_0$  без първоначално позициониране с GPS.

Ако навигационна система първоначално позиционира БЛА с отклонение  $\nabla_{x,y}$  е константа с известна стойност за каква и да е височина, формула (5.8) се преобразува в:

$$\boldsymbol{h_{0max}GPS}[m] = \sqrt{10^{P_T - S_{RX} - 20.lg(fc) - 20.log10\left(\frac{4\pi}{c}\right) + G - dPF(\theta - \theta_0))/10} - \nabla^2_{x,y}}.$$
 (5.9)

Величината  $dPF(\theta)$  отчита стойността на разликовата диаграма на ФАР, например характеристиката от фиг.4.11 и  $\theta$  = atan( $\nabla_{x,y}/h_{0max}GPS$ ).

Зависимостта от (5.7) е изобразена на фиг.5.36 при същите параметри на комуникационната система за случая от фиг.5.3а., а грешката от първоначалното позициониране със спътникова навигационна система е  $\nabla_{x,y} = 6m$ .

Ако се използва вариант на приемник от фиг.3.12, изграден с филтър, усилвател и логаритмичен детектор, неговата чувствителност е:

$$S_{RX}[dBm] = K_A[dB] + K_F[dB] + S_{EAD}[dBm]$$
(5.10),

Ако апаратът е първоначално позициониран с GPS с точност от  $\nabla_{x,y} = 6m$  и приемникът има чувствителност от -83dBm, то тогава максималното разстояние е много по голямо от случая на фиг.5.2a и е около 1000m и при -115dBm над 10km.

И двата варианта показват напълно приемлив резултат, определящ практическата приложимост на разработените и изследвани проблеми.

#### 5.1.2 Симулационно изследване на алгоритъма за автоматично кацане.

Алгоритъмът за автоматично кацане е изследван чрез създаден програмен код в среда МАТЛАБ. Използват се измерените ДНД и апроксимираните разликови диаграми за четирите състояния на псевдоконично сканиране за сензор ФАР 2х2 приемник с логаритмичен детектор. Алгоритъмът е симулиран без Калманова филтрация. Интегралният и пропорционалният коефициент на дискретния PI контролер са избрани  $K_I = 1, K_P = 0.55$  така, че да се осигури устойчивостта на системата [162].

Влиянието на случайната грешка е изследвана за два момента:

- 1. С отчитане на определеното опитно стандартното отклонение на мощността в Глава 4, резултати 5.4 а) и б) при две начални височини *ho*=15m и *ho*=45m;
- 2. При максимална височини с използване на полиномната апроксимация на дисперсията на шума.

#### Изследване на алгоритъма за две начални височини ho=15m и ho=45m

Началната височина за групата симулации е ho=15m и ho=45m, стъпката е  $\Delta h=0.5$ m или БЛА има определен брой позиции в 3D пространството. Началното отклонение в плоскостта xOy е различно но при случая за ho=15m отклонението е  $\pm 25^{\circ}$ , повече от  $\Theta_0$ , а за ho=45m,  $\pm 20^{\circ}$ . Определянето на реалното местоположение се извършва с измерените разликови характеристики на ФАР, а корекцията на местоположението се прави с апроксимираните такива.

Влиянието на грешката от измерване на приетата мощност е симулирано като към измерената мощност се добавя Гаусов шум с параметри  $N(0, std^2)$ . Стандартното отклонение на мощността е взето от резултатите от Фигура 5.4 а) и при използваните системни параметри на комуникационния канал std = 0.14 dB за височина 15m и std = 0.45 dB за ho=45m. Изследването е извършено по метода Монте Карло с 1000 опита.

Резултатите, дадени на Фигура 5.4 се отнасят за начална височина ho=15m. Фигура 5.4 а) илюстрира процеса на кацане спрямо 3D координатната система на площадката за кацане, а Фигура 5.4 б) показва статистиката на координатите на оценената позиция а края на алгоритъма – hmin=1m над сензора. Стандартното отклонение е от порядъка на 0.7 ст или точността на позициониране във финалния етап е напълно задоволителна.



Фигура. 5.4. Симулация на алгоритъма за кацане при начална височина на БЛА *ho*=15m и начално отклонение на обекта на ±25°. (**a**) 3D траектории на кацане; (**b**) Координати на обекта за височина *hmin*=1m над сензора.

В дисертационният труд е представено изменението на координатите x, y в процеса на кацане спрямо височината ho=45m. Изследван е най-тежкия случай при който стандартното отклонение на измерената мощност, съгласно Фигура 5.5 б), е std = 0.45 dB и не се променя. Утежняването тук идва от това, че при симулацията дисперсията на Гаусовия шум не се променя от разстоянието между обекта и сензора. Стандартното отклонение на

координатите за последната точка от кацането е от порядъка на std=1.26 cm. Обобщението на данните е изложено в Таблица 5.1. Резултатите са получени след статистическа оценка от 1000 опита.

Таблица 5.1. Резултати от изследване на стандартното отклонение на координатите *x*,*y* в края на алгоритъма за кацане.

Начална височина <i>ho</i> [m]	Стандартно отклонение на мощността [dB]	x, y координати стандартно отклонение <i>hmin</i> = 1 m
15	0.14	0.72 cm
45	0.45	1.26 cm

## Изследване на алгоритъма при максимална височина с отчитане на случайната грешка от измерване на мощността.

Тук работата на алгоритъма е изследвана за максимална височина на БЛА  $h_{0max} = 100m$  при чувствителност на приемника -83dBm (приемник с логаритмичен детектор). В точка 4 на алгоритъма влиянието на случайната грешка във функция от височината се моделира чрез формула (4.8). Или дисперсията на случайната грешка от измерване на мощността е различна за различни височини и тя е намаляваща функция.

Поради това, че началната височина е много по голяма се предлага броят на позициите по височина на БЛА да се намали, като се модифицира точка 7 на алгоритъма. Намаляването на височината вместо с фиксирана стъпка  $\Delta h = 50$  ст да се извършва по логаритмичен закон по формулата :

 $z_k = h_k = h_k - \Delta h, \ \Delta h = 100.lg(h_k)$  [cm].

Статистическото изследване на грешката от позициониране е извършено с 10000 опита.

В Таблица 5.2 са обобщени резултатите от симулация на алгоритъма за различни начални отклонения на БЛА по осите x и y. Отчетени са стандартните отклонения от центъра на площадката в края на алгоритъма на височина < 50 cm, и допълнително е оценен коефициента на грешка на алгоритъма. Той представлява отношението на неуспешните опити към общия брой опити за кацане. Неуспешен опит за кацане се смята този, при който отклонението в хоризонтална равнина на БЛА от центъра на площадката в края на алгоритъма е повече от 10 cm.





Фигура 5.6. Симулация на алгоритъма за кацане при начална височина на БЛА *ho*=100m и начално отклонение на обекта на ±20°. а) 3D траектории на кацане при начално отклонение *x*<sub>0</sub>=36.4m, *y*<sub>0</sub>=36.4m; б) 3D траектории на кацане при начално отклонение *x*<sub>0</sub>=36.4m; б) 3D траектории на кацане при начално отклонение *x*<sub>0</sub>=0m.

<i>xo</i> [m]	<i>yo</i> [m]	Стандартно отклонение на <i>x</i> , <i>y</i> координати [cm]	Грешка на
$\Theta_0 = \pm 20^\circ$	$\Theta_0 = \pm 20$	hmin = 0.5  m	алгоритъма
36.4	36.4	0.33	<10 <sup>-4</sup>
-36.4	36.4	0.35	<10 <sup>-4</sup>
-36.4	-36.4	0.38	2.10 <sup>-4</sup>
36.4	-36.4	0.33	<10 <sup>-4</sup>
36.4	0	0.34	<10 <sup>-4</sup>
0	36.4	0.32	<10 <sup>-4</sup>
0	-36.4	0.29	<10 <sup>-4</sup>
-36.4	0	0.35	<10 <sup>-4</sup>
0	0	0.27	$< 10^{-4}$

Таблица 5.2. Начална височина *ho=100*m

Получените резултати в тази глава и представени подробно в дисертационния труд доказват, че алгоритъмът е сходящ при максимална височина, въпреки въздействието на систематичната и случайната грешка от измерване на мощността на приетия сигнал. В края на алгоритъма се реализира необходимата точност за позициониране на БЛА в центъра на площадката. Стандартното отклонение е не повече от 0.5 cm.

#### 5.2. Алгоритми за следене.

Разработеният сензор на системата за автоматично приземяване на БЛА може да се интегрира в система за следене на летателни апарати, а поради ПКС тази система би имала необходимата надеждност, точност и бързодействие. За пробиране на предишното предположение е проектиран и реализирана система с механично следене, чрез завъртане на ФАР. Тук се използва отново сензора ФАР с 2х2 и пач елементарен излъчвател с кръгова поляризация. Параметрите на радио системата са същите като описаните в глава 3. Алгоритмът на работата на системата за следене е представен на блокова схема Фиг. 5.8



Фиг. 5.8 Блок диаграма на разгледаният алгоритъм.

#### Резултати от работа на алгоритъма и системата за следене.

Работата на алгоритъма и системата за следене е изследвана практически, като първоначално БЛА е неподвижен спрямо системата за следене на разстояние 15m, даващо достатъчно ниво на приетата мощност и относителна височина от 3m. Поради това, че изследването има за цел да се демонстрира работоспособността на предложения подход и разработените алгоритми БЛА се движи със скорост в пространството, по малка от възможностите на механичната система. Фигури 5.9 д) ÷ 5.9 е), показват реални данни от проследената траектория на движение на БЛА в ъглови координати, чрез използване на система за автоматично следене използваща описаният алгоритъм. Като първоначалната точка е нулево позиция на сензорът на следене, а не позицията от която е прихванат БЛА.



Фиг.5.9. Графики показващи проследената траектория на движение на БЛА, чрез използване на система за автоматично следене използваща описаният алгоритъм

#### 5.3. Изпълнени цели, задачи и изводи от пета глава:

- **Предложен е алгоритъм** за автоматично кацане на БЛА, използващ разработения подход за определяне на ъгловите координати на обекта на основата на линейна апроксимация на разликовите ДНД в логаритмичен мащаб. За намаляване на средната квадратична грешка от позициониране е приложена пропорционално интегрална корекция на позицията на БЛА. За увеличаване на скоростта на кацане и броя на точките на корекция на височината е предложено да се използва логаритмичен мащаб на изменение на същата.

- На основата на предложения алгоритъм е определена работната височина на системата за позициониране. Минималната височина от която започва работа на алгоритъма се ограничава от точността на вградената навигационна система или това е максималната височина от която алгоритъмът за позициониране може да оперира. Максималната височина от която може да започне процесът на кацане е определена на основата на енергийният бюджет на радиовръзката. Работната височина е определена с и без първоначално позициониране с GPS и различна чувствителност на приемника с параметрите на радиокомуникационната система дефинирани във втора глава. Резултатите показват, че при използване на опростен вариант на приемник с чувствителност от порядъка на -83dBm приземяването на БЛА може да започне от: 100 метра без първоначално позициониране с GPS и около 1000 метра с първоначално позициониране с GPS. Ако се използва приемник с по голяма чувствителност разстоянието на оперирането на системата се увеличава съответно на 4км и 10км. И двата варианта показват напълно приемлив резултат определящ практическата реализуемост на разработените и изследваните проблеми.

- Симулационно е изследвана работата и точността на алгоритъма за автоматично кацане с отчитане влиянието на систематичната грешка на сензора и влиянието на случайната грешка от измерване на точността. Систематичната грешка е включена в симулационния модел и ъгловите координати се определят на основа на предложения подход чрез разликовите диаграми и тяхната линейна апроксимация. Случайната грешка се моделира със случаен процес, имащ нормално логаритмично разпределение, като това е обосновано на базата на особеностите изследвана система и получените резултати от предишните глави.

- Синтезиран е програмен код на Матлаб чрез който се изследва алгоритъмът за автоматично кацане без Калманова филтрация и подходящо подбрани стойности на пропорционално интегралния контролер, така че да се осигури устойчивост на системата.

- Изследвани са два варианта с отчитане на опитното определено стандартно откронение на мощността фиг. 5.4а,6 за две начални височини 15мм и 40 мм, начално ъглово отклонение ±25 градуса за двете ъглови координати и при максимална височина с използване полиномна апроксимация на дисперсията на шума формула (4.8) и начално ъглово отклонение ±20 градуса за двете ъглови координати. Изследвана е грешката на работа на алгоритъма и стандартното отклонение на координатите на БЛА в края на алгоритъма по метода на Монте Карло след статистическа оценка от 10000 опита. Демонстрирани са и траекториите на кацане фигури 5.4, 5.5, 5.6. Получените резултати доказват, че предложения алгоритъм е сходящ при всички изследвани случаи, въпреки въздействието на систематичната и случайната грешка от измерване на мощността на приетия сигнал. В края на алгоритъма се реализира необходимана точност за позициониране на БЛА спрямо центъра на площадката. Стандартното отклонение е не повече от 0.5см и точността от позициониране във финалния етап на алгоритьма е напълно практически задоволителна.

- На основата на предложения подход за оценка на ъгловите координати с използване на разликовите ДНД на ФАР и тяхната линейна апроксимация е предложен алгоритъм на система за следене на БЛА с псевдо конично сканиране. За целите на изследването е проектирана и реализирана система за автоматично следене. Разработен е програмен код на алгоритъма, които е имплементиран в нея. Представените измерени резултати от работата на алгоритъма и системата за следене доказват приложимостта на предложения подход за оценка на ъгловите координати и разработения алгоритъм за следене.

### НАУЧНИ ПРИНОСИ

- Предложен е подход за определяне на ъгловите координати на БЛА чрез ФАР с псевдоконично сканиране т.4.1. Наложено е изискването подходът да кореспондира с опростен алгоритъм за оценка на ъгловите координати с използване само на мощността на приетия радиочестотен сигнал. Оценката се извършва с изведена система линейни уравнения (4.7), използваща Гаусова апроксимация на ДНД и последваща линейна апроксимация на измерените или симулирани разликови диаграми в логаритмичен мащаб на ДНД (4.3 a), (4.3 б), (4.4 a), (4.4 б) (4.5) за различните състояния на псевдо конично сканиране.
- 2. Предложени са модифицирани периодични структури, които подобряват динамичния обхват на сензора за псевдоконично сканиране ФАР, чрез поставянето им пред излъчващата апертура на ФАР. Проектирани, реализирани и изследвани са следните структури: фотонни периодични структура тип огледало на Брейк: PBG\_Структура\_0, PBG\_Структура\_1; Z-образни EBG периодични структури: EBG\_Структура\_0, EBG\_Структура\_1, EBG\_Структура\_3, EBG\_Структура\_4; модифицирана гъбообразна EBG: ГО\_EBG\_ Структура \_1, ГО\_EBG\_ Структура\_2, ГО\_EBG\_Структура \_3, ГО\_EBG\_Структура\_4. Чрез симулационно изследване и измервания са определени оптималните разстояния между антената и периодичния обхват на работата на САС с ПКС и увеличава коефициентите на усилване на антените за дефинираните в работата условия.

### НАУЧНО ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- 1. Представена е методика за определяне на връзката между височината, от която може да започне процесът за безпилотно кацане на БЛА, спрямо ъгъла на ДНД на сензора – интегрираната антена в системата за приземяване, при различна чувствителност на приемника – т.2.3. Чрез нея грубо се определя максималното разстояние на опериране на системата. На основата на получените резултати може да се подбере чувствителността на приемника и те показват, че при така подбраните параметри на радиокомуникационната система, процесът на безпилотно приземяване на БЛА с псевдо конично сканира, чрез радио честотна обработка може да започне от приемлива височина и от енергийна гледна точка се доказва нейната реализуемост.
- 2. Предложен е алгоритъм за автоматично кацане на БЛА, използващ разработения подход за определяне на ъгловите координати на обекта на основата на линейна апроксимация на разликовите ДНД в логаритмичен мащаб. За намаляване на средната квадратична грешка от позициониране е приложена пропорционално интегрална корекция на позицията на БЛА. За увеличаване на скоростта на кацане и броя на точките на корекция на височината е предложено да се използва логаритмичен мащаб на изменение на същата. Алгоритъмът е изследван симулационно със синтезиран програмен код, като е оценена точността му с отчитане влиянието на систематичната грешка на сензора и влиянието на случайната грешка от измерване. Случайната грешка е моделирана със случаен процес, имащ нормално логаритмично разпределение и използване полиномна апроксимация на дисперсията на шума формула (4.8), като това е обосновано на базата на особеностите на изследвана система и получените измерени резултати (фиг.5.4а,б). Изследвана е грешката на работа на алгоритъма и стандартното отклонение на координатите на БЛА в края на алгоритъма по метода на Монте Карло след статистическа оценка. Получените резултати доказват, че предложения алгоритъм е схоляш при всички изследвани случаи, въпреки въздействието на систематичната и случайната грешка от измерване на мощността на приетия сигнал.
- 3. На основата на предложения подход за оценка на ъгловите координати с използване на разликовите ДНД на ФАР и тяхната линейна апроксимация е предложен алгоритъм на система за следене на БЛА с псевдо конично сканиране. За целите на изследването е проектирана и реализирана система за автоматично следене. Разработен е програмен код на алгоритъма, които е интегриран в нея. Представените измерени резултати от работата на алгоритъма и системата за следене доказват приложимостта на предложения подход за оценка на ъгловите координати и разработения алгоритъм за следене.

### ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Предложени са и са анализирани пет възможни варианта за реализация на система за автоматично кацане на БЛА с радиочестотна обработка, посредством псевдо-конично сканиране т.2.1. в зависимост от разположение на предаващата и приемната част на системата. Избран е най-приемливия вариант, при който предавателната част е на БЛА, а приемната част се намира на ПК - фиг.2.4. За него са предложени структурни схеми и са дефинирани функционалните изисквания и техническите параметри за всеки елемент от тях: антенната система и честотния обхват на радиочестотното позициониране, предавателна и приемна част, както и функционалностите за определяне на местоположението на апарата в пространството спрямо координатната система на площадката за кацане (ПК.
- 2. На основата дефинираните технически изисквания и функционални възможности, с известни методики е проектирана и реализирана базова приемна част на системата по избрания вариант. Проектирани, реализирани, измерени и са анализирани: базова ФАР с 2х2 пач елементарни излъчватели за ПКС (фиг. 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 и 3.10) и приемната част за радиочестотна обработка системата т.2.1.3 и фиг.3.12.
- 3. В резултат на предложените модифицирани периодични структури симулационно и чрез измерване са изследвани и сравнени радиационните диаграмите на следните варианти на ФАР антени с имплементирани в тях PBG и EGB структури: Пач антена и пач-яги антена с и без оптимизирана PBG\_Структура\_1 (Фиг.3.23, Фиг.3.24, Фиг.3.25, Фиг.3.26); Пач антена с и без EBG\_Структура\_1, EBG\_Структура\_2, EBG\_Структура\_3 и EBG\_Структура\_4 (фигури 3.39 ÷ 3.42, таблици 3.37 и 3.38, таблица 3.10, фиг.3.49-3.53); ФАР 2х2 Пач елементи с и без гъбо-образна EBG 1,2,3,4 (Фигури 3.59-3.69 таблици 3.12 3.15); Кръгово поляризирани ФАР, съставени от линейно поляризирани квази Яги антенни с интегриране на PBG структура (фиг.3.79-3.83, таблица 3.15). Направените изследвания доказват, че предложените топологии на ФАР са подходящи за реализиране и увеличаване на динамичния обхват на системата за автоматично кацане, поради подобряване на радиационите характеристики на сензора.
- 4. Изследвана и оценена е систематичната грешка на позициониране при използвания подход за определяне на ъгловите координати. Оценена е грешката от позициониране при използване на синтезираните и симулационно изследвани различни антенни системи: ФАР с пач елементарен излъчвател и кръгова поляризация – базова конфигурация, Фигури: 4.12 а), 4.12 б), 4.13 а) и 4.13 б), 4.14 а), 4.14 б), 4.15 а) и 4.15 б); ФАР 2x2 с интегрирана гъбообразна ЕВG структура - фигури 4.16 а) и 4.16 б); ФАР 2x2 с интегрирана Z-образна EBG структура; ФАР 2х2 с Квази-Яги антени и интегрирана фотонна структура в топологията на елементарният излъчвател. Сравнението на резултатите показва, че разликата в грешката на работа на сензора между симулирания и измерения вариант е пренебрежима и абсолютните грешки на ъгловите координати намаляват с намаляване на ъгловото отклонение на БЛА от центъра на ПК. Абсолютната грешка от позициониране за центъра на площадката за измерените диаграми е част от градуса, което доказва, че ФАР с подобрени параметри, посредством изследваните в глава 3 периодични структури са приложими в система за автоматично приземяване на БЛА. Предложеният подход на апроксимиране и определяне на ъгловите координати чрез разликовите диаграми на ФАР може на практика да се реализира и има необходимата точност в процеса на кацане на БЛА.

### СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Към дисертационният труд има публикувани 9 публикации в международни конференции, индескирани в Scopus и или Web of Silience. Към тези публикиции има 7 цитирания.

Списък на публикациите:

- Iliev, I., & Nachev, I. (2022). Automatic Landing of Unmanned Aerial Vehicles via Wireless Positioning System with Pseudo-Conical Scanning. Sensors, 22(17), 6451, https://doi.org/10.3390/s22176451, IF 3.9, SJR 0.76, Q1
- I. Nachev and I. Iliev, "Linearly polarized phased antenna array with an application for the automatic landing of unmanned flying vehicle," 2022 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Ohrid, North Macedonia, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEST55168.2022.9828473.
- 3. I. Nachev and I. Iliev, "Linearly polarized phased antenna array with an application for the automatic landing of unmanned flying vehicle," 2022 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Ohrid, North Macedonia, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEST55168.2022.9828473.
- 4. I. Nachev and I. G. Iliev, "Circularly Polarized Phased Antenna Array with Pseudo-Conical Scanning with an Application for UAVs Unmanned Landing," 2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELECOM56127.2022.10017320.
- 5. I. Nachev and I. G. Iliev, "Study of Band Gap Structure for Improving Antenna Radiation Pattern," 2021 29th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELECOM53156.2021.9659719.
- 6. I. Nachev and I. Iliev, "Improving an antenna radiation pattern using photonic band gap structure," 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 137-140, doi: 10.1109/ICEST52640.2021.9483462.
- 7. I. Nachev, "Photonic Band Gap Structure Integration in Topology for the Design and Manufacture of Quasi-Yagi Antennas," 2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), Veliko Tarnovo, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/CIEES55704.2022.9990702.
- 8. I. Nachev and I. G. Iliev, "Z-shape EBG Structure Improving the Phased Antenna Array Radiation Pattern with Autonomous Aerial Vehicle Navigation Application," 2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELECOM56127.2022.10017261.
- 9. Nachev, I., & Iliev, I. (2022). Study of a Mushroom-like EBG Structure Integration in Phased Antenna Array with Improving Radiation Characteristics Purposes. Microwave Review, 28(2).

Участие в договори:

Договор № 212ПД0005-07: "Система за автоматично кацане на безпилотни летателни апарати чрез микровълнови антенни решетки", Финансиран от ТУ-София за подпомагане на докторанти.

### Ivaylo Naydenov Nachev, M.Sc.

## MEANS AND ALGORITHMS FOR AUTOMATIC LANDING OF UAV VIA RADIO FREQUENCY PROCESSING AND PSEUDO CONICAL SCANNING

### **Abstract of Ph.D. Thesis**

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in recent years for various applications is an indisputable fact. Many new ideas and results related to automation of UAV operation processes appear in scientific publications. Various developments are being published for their navigation and automatic landing. Most of them are based on differential GPS systems, using pseudo-conical scanning, with a laser optical curtain and image recognition of the landing pad.

The present work aims to develop a system for automatic landing of unmanned aerial vehicles. The objective is achieved through the analysis, development and research of means and algorithms for positioning with radio frequency processing and pseudoconical scanning with reduced computational complexity. The idea is borrowed from the conical scanning antennas for automatic jumping of spacecraft. Integrating this technology into unmanned landing pads for UAVs will allow them to land in hard-to-reach outdoor and indoor spaces. Here, the burden falls on the analysis and definition of the basic requirements and technical parameters of the radio communication system, which will realize the set idea. In order to carry out the scientific research in the dissertation and to test the proposed ideas, many additional tasks related to the design, simulation, fabrication and measurement of various elements and means of a system with pseudoconical scanning were solved. In view of the applicability of the proposed ideas, the limiting factors were investigated and evaluated operating conditions, the systematic and random positioning error, and on this basis, algorithms for automatic landing and tracking of UAVs, using a special simplified approach to determine the angular coordinates of the object, have been developed.

The integrity of the scientific research has been achieved, and in the dissertation work, the ideas and research have found a place in five chapters. In the first chapter, a literature review of the methods and means of automatic landing of UAVs, the methods of locating targets by radio frequency processing, means of improving the qualitative indicators of PAR with PCS through periodic structures is made.