

**Повишаване точността при измерване разстоянието до
въздухоплавателно средство при кацане, с приложение на
многопозиционна локация**

София Узунова, Михаил Желязов

Технически Университет – София

e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, e-mail: mikael@tu-sofia.bg

Ключови думи: многопозиционна радиолокация; публикувана траектория; подход към летището; данни за местоположението

В доклада е описан метод за валидиране на на ADS-B сигнали чрез използване на многопозиционна радиолокация. За целта беше създадена среда за симулация и софтуерен пакет в MATLAB. Симулационната среда моделира базова ситуация, която определя разстоянието до входящо въздухоплавателно средство по известна траектория за подход към летището, и ситуация с добавяне на противник. Избрано е международно летище Васил Левски - София (LBSF) и публикувана траектория за подход (MOREK 4H), за реален сценарий при кацане с две величини на данните за местоположението на летателния апарат.

**Improving the Accuracy of Measuring Aircraft Distance During Landing
Using Multistatic Radar**

Sofia Uzunova, Mihail Zhelyazov

Technical University of Sofia

e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, e-mail: mikael@tu-sofia.bg

Keywords: multistatic radar; published trajectory; airport approach; position data

This report presents a method for validating ADS-B signals through the application of multistatic radar. For this purpose, a simulation environment and a MATLAB-based software package were developed. The simulation models a baseline scenario that determines the distance to an inbound aircraft on a published approach trajectory to the airport, as well as a scenario including a potential adversary. The selected case study involves Vasil Levski International Airport – Sofia (LBSF) and the published approach trajectory MOREK 4H, representing a realistic landing scenario with two sets of aircraft position data.

Въведение:

Методът се базира на симулация, която моделира теоретичен полет на самолет, докато той следва траекторията на подхода и излъчва местоположението си над ADS-B. Данните са симулирани, за определяне на основната точност при моделиране чрез многопозиционна радиолокация. След като е определена базовата линия, в симулацията е въведен противник. Сценарият на противника е конфигуриран да моделира ситуация на измама. По-конкретно, противникът ще излъчва ADS-B пакети данни, за да създаде „призрачен“ самолет по вектора на

подхода MOREK 4H. Системният модел ще вземе излъченото местоположение и ще го сравни с местоположението, предоставено от изчислението на многопозиционната радиолокация. Ако разликата между местоположението на ADS-B и изчисленото местоположение е по-голяма от базовия праг, точката ще бъде маркирана като подозрителна.

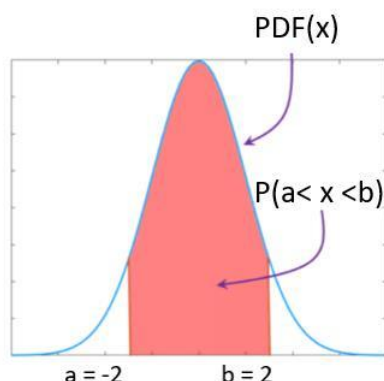
Тази конфигурация е симулирана с 4 различни топологии на приемната кула ADS-B. Кулите в сценарии 1 – 3 образуват равностранни триъгълници и са строго теоретични, докато сценарий 4 разполага трите кули и основните летища в България.

Теория на метода:

EASA не документира публично къде съществуват ADS-B приемни кули поради мерки за националната сигурност. Въз основа на това ограничение бяха избрани теоретични местоположения в страната. Голяма част от симулацията се фокусира върху триъгълна топология с LBSF в центъра на масата. В последния сценарий беше проучена по-реална ориентация, базирана на представянето на предишните симулационни повторения, които поставиха кулите на летище Пловдив, летище Варна и летище Бургас. Това позволи да се сравни правдоподобна топология от реалния свят.

Предполага се също, че всяка от кулите е оборудвана с Глобална Навигационна Сателитна Система за връзка с ВС, за да се възползва от сигнала на GPS часовника. Този сигнал осигурява изключително високо ниво на точност и е от жизненоважно значение за осигуряване на адекватно времево отбелязване.

Отчитане на местоположението чрез GPS: Местоположението на ADS-B разчита на GPS, за да предостави данни в реално време за съобщаване на местоположението на самолета. Въз основа на правителствения стандарт, осигурен от EASA, по-малко от 2 метра точност трябва да се осигури в 95% от времето. Това ниво на шума на сигнала беше подредено в рамките на симулацията при допускането за разпределение на вероятността на Гаус. За да се приложи произволен шум на Гаус в средата на MATLAB, беше необходимо стандартното отклонение (δ) и средното (μ). Приемайки средна стойност нула, Уравнение 2 по-долу беше използвано за определяне на стандартното отклонение на шума. В тази ситуация $a = -2$ метра и $b = 2$ метра, както е показано на фигура 6.



Фигура 1: Функция за нормална вероятностна плътност на шума на GPS местоположението.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad P(a \leq X \leq b) &= 1 - Q\left(\frac{\mu - a}{\delta}\right) - Q\left(\frac{b - \mu}{\delta}\right) \\
 0.95 &= 1 - Q\left(\frac{0 - (-2)}{\delta}\right) - Q\left(\frac{2 - 0}{\delta}\right) \\
 0.95 &= 1 - Q\left(\frac{2}{\delta}\right) - Q\left(\frac{2}{\delta}\right) \\
 2Q\left(\frac{2}{\delta}\right) &= 0.05; \quad Q\left(\frac{2}{\delta}\right) = 0.025
 \end{aligned}$$

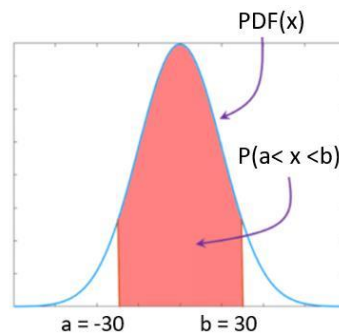
$Q(2.805) \approx 0.025$ (Изчислено чрез Q-таблици в ПРИЛОЖЕНИЕ А: Таблица за търсене на Q-функция)

$$\delta = \frac{2}{2.805} = 0.713 \text{ метра,}$$

където, δ е стандартното отклонение, а μ е средното отклонение.

Използвайки изчисленото стандартно отклонение (δ) и приетата средна стойност, допълнителният шум от данните за GPS местоположението може да бъде добавен в симулационната среда за по-реалистичен модел.

Синхронизиране на GPS часовник: За да се извършат правилно изчисленията на многопозиционната радиолокация, по-специално частта за маркиране на времето, всяка от кулите трябва да използва един и същ часовников сигнал. За тази симулация е използван часовник, базиран на GPS, както и документираното ниво на точност. Това позволи на шума от реалния свят да влезе в симулацията, за да осигури по-точно представяне на приложението. Въз основа на публикувания стандарт, GPS часовникът е точен до по-малко от 30 ns, 95% от времето [1,2,3]. Приемайки гаусово разпределение на шума, уравнение 2 беше използвано за определяне на стандартното отклонение (δ) с нулева средна стойност (μ). В тази ситуация $a = -30$ ns и $b = 30$ ns, както е показано на фигура 2.



Фигура 2: Функция за нормална вероятностна плътност на шума на GPS часовника

$$\begin{aligned}
 (2) \quad P(a \leq X \leq b) &= 1 - Q\left(\frac{\mu-a}{\delta}\right) - Q\left(\frac{b-\mu}{\delta}\right) \\
 0.95 &= 1 - Q\left(\frac{30}{\delta}\right) - Q\left(\frac{30}{\delta}\right) \\
 2Q\left(\frac{30}{\delta}\right) &= 0.05 \\
 Q\left(\frac{30}{\delta}\right) &= 0.025 \\
 Q(2.805) &\approx 0.025 \\
 \delta &= \frac{30}{2.805} = 10.695 \text{ ns}
 \end{aligned}$$

Където, δ е стандартното отклонение, а μ е средното отклонение.

След това тази информация беше използвана в софтуера MATLAB, за да се добави шум от GPS часовника към създаването на времева марка, когато бяха получени ADS-B пакетите.

Трябва да се отбележи, че много вътрешни закъснения (оборудване, предаване, изчисление и т.н.) могат да бъдат добавени към симулационния модел за по-нататъшно внедряване на системата в реалния свят. В рамките на тази симулация не са взети предвид никакви други закъснения или шум на сигнала, освен GPS местоположението и синхронизирането на GPS часовника.

Изчисляване многопозиционната локация и подходния маршрут на симулацията

За да се определи теоретичното 2-D местоположението на сигнала, са необходими три вида информация, включително координатите X-Y на всяка кула и съответния времеви маркер на получения сигнал. Въз основа на уравнение 1, от Чан [17], местоположението на сигнала е получено.

$$(3) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} * \left\{ \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\}$$

където::

$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ = изчисленото местоположение на сигнала

$x_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1 в координатата x

$y_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1 в координатата y

$r_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1

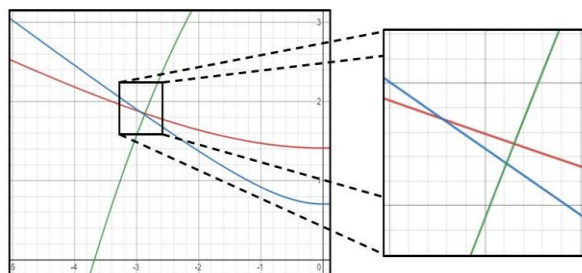
$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$

$K_i = x_i^2 + y_i^2$

Само две величини бяха избрани да бъдат изследвани въз основа на ограничения ефект, при който височината на ЛА би имала върху цялостното изчисление на многопозиционната локация, значителното увеличение на сложността на необходимия 3-D алгоритъм и добавянето на четвърта приемна кула в рамките на системата. Например, в началото на моделираната траектория на подхода, която е изследвана, височината на самолета трябва да е близо до 17 000 фута, но все пак да е на разстояние, повече от 500 000 фута от местоназначението си. Това се

равнява на ~97% тежест на координатите на географската ширина и дължина (x, y) срещу ~3% тежест на стойността на надморската височина (z).

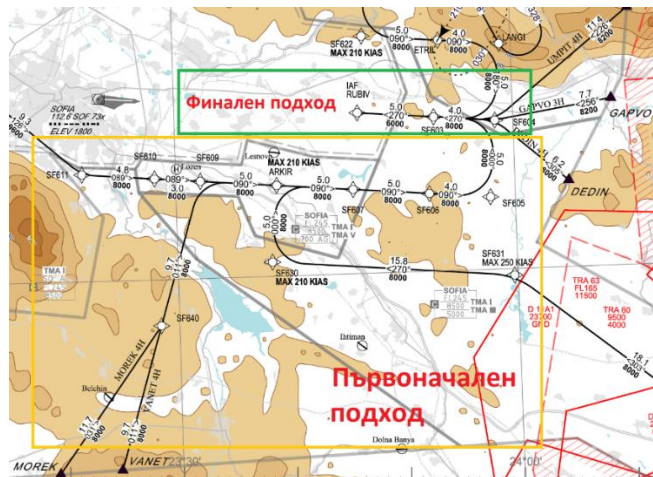
Освен това, когато се приложи аритметиката за извършване на 3-D изчисление на многопозиционната локация, сложността на изчислението се увеличава поради множеството пресичания, които произвеждат 3те хиперболични уравнения [4]. След това е необходим детерминистичен модел, за да се определи коя от точките на пресичане е най-вероятно правилната, тъй като местоположението им рядко се намира съвместно. Пример може да се види на Фигура 3, илюстрираща най-често срещания сценарий с 3 възможни пресичания. И накрая, физическото изпълнение на симулацията също би изисквало добавяне на допълнителна кула към системата. Въз основа на тези фактори и субективно ограничената полза при определяне на надморската височина на източника на ADS-B сигнала, беше изследвана само двумерна симулация.



Фигура 3: Пресечни точки на 3 хиперболични уравнения

За да се основе симулацията в реалността, действителният път на подход към LBSF беше избран като базова линия и противников вектор. MOREK 4H, показан на фигура 4, е един от многото подходи, публикувани от Vulatsa. Този вектор е точно представяне на типа движение на търговският самолет по време на кацане. Фиг. 4 показва различните сегменти от пътя на подхода, като посочва минималната надморска височина (ft), навигационния курс (в градуси) и дължината (в морски мили).

Освен това скоростта на подхода варира в зависимост от частта от подхода. Когато ЛА се приближи до кацане, скоростта се коригира въз основа на препоръките на УВД [5]. Тази информация беше използвана в рамките на симулацията, за да помогне за дефинирането на потока от данни на двата ADS-B пакета за местоположението (2 Hz).



Фигура 4: Маршрут на подход MOREK 4H [21]

За добавяне на влиянието на „противник“, трябва да се определи праг, който да позволи на УВД да „маркира“ пакета с данни за местоположението като „подозрителен“. Това ще бъде сравнението между докладваното местоположение на ADS-B и изчисленото местоположение на многопозиционната локация. Ако разликата между двете групи от данни в конкретен времеви момент е по-голяма от праговата стойност, това ще означава, че сигналът е бил „подправен“.

За да се определи прагът за маркиране, който ще бъде приложен по време на частта от симулацията при добавяне на противник, беше проведено проучване на базовата производителност. Всеки сценарий беше повторен 10 000 пъти, за да се определи средната

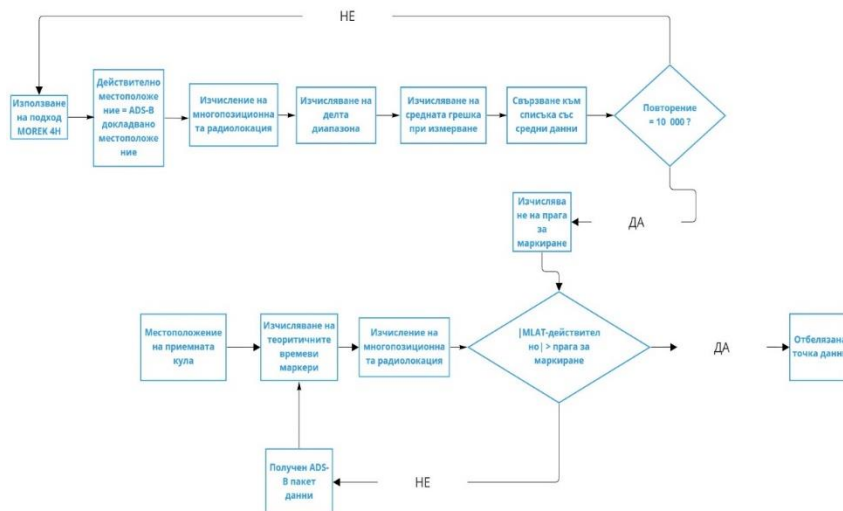
грешка при измерване и стандартното отклонение на точките от данни. Приемайки базова производителност от 99% ($\leq 1\%$ фалшиво маркиране) и потвърдено гаусово разпределение на вероятностите, прагът за маркиране беше определен с помощта на Q-функцията [6].

$$(4) \quad 0.99 = 1 - Q\left(\frac{b}{\delta}\right),$$

Където: δ - стандартно отклонение.

След като тази стойност беше определена, тя беше използвана при добавянето на противник, за да се определи как стационарен и движещ се противник ще повлияе върху производителността на модела за всяка топология на кулата.

Базова производителност – Взето е решение за изчисляване на прага на маркиране на базовата линия за подход със специфична топология на приемната кула. След като прагът беше определен, стойността беше използвана, за да се определи дали полученият ADS-B пакет данни за местоположението на ЛА е бил подправен от противника. В модела беше изследван неподвижен, и движещ се „противник“. Освен това, с всеки различен сценарий, топологията на приемните кули се променя, за да се определи дали има промяна в производителността. Основна блок-схема на симулационния модел може да се види на фиг. 5.



Фиг. 5: Диаграма на симулацията

Както се вижда на Фигура 5 и е посочено кода за симулация на MATLAB – „Създаване на подхода на MOREK 4H“, симулацията създава пътя на подхода на MOREK 4H, който да се използва като „действителни“ данни за местоположението. След това данните за местоположението от ADS-B се създават чрез добавяне на шума на GPS местоположението към данните за действителното местоположение. След това алгоритъмът MLAT, работещ по израз (1) и споменат в „код за симулация на MATLAB – изчисляване разликата във времето на пристигане“, се използва за определяне на изчисленото местоположение на всяка точка от данни, въз основа на изчислените шумови времеви маркери. След това стойността на грешката на измерване във всяка точка се изчислява, като се вземе средноквадратичното между местоположението на MLAT и данните за местоположението, излъчени от ADS-B. След това се изчислява средната грешка на измерване за цялата траектория на подхода.

Цялата тази последователност се повтаря 10 000 пъти - код за симулация на MATLAB – „Базова производителност“, за да се получи голям размер на извадката от информация и да се определи средната стойност на грешката при измерване на базовата линия и стандартното отклонение. След това средната стойност и стандартното отклонение се използват за изчисляване на прага за маркиране въз основа на 99% стойността на производителност ($< 1\%$ от фалшиво положително) за базовите условия. Например, ако известен реален самолет следва подхода на MOREK 4H, тогава 99% от времето данните за неговото местоположение няма да бъдат маркирани.

След като този праг за маркиране е определен, симулацията след това обработи както базовите, така и данните за противниковото добавяне и съответно ги маркира.

Добавяне на противник: Въз основа на прага за маркиране, определен в рамките на базовата симулация, в системата са поставени неподвижен и движещ се противник, „код за симулация – добавяне на стационарен противник“ и „код за симулация – добавяне на движещ се противник“. Всеки противник беше разположен на 10 км директно на север от центъра на LBSF, като стационарният противник остана на място, а движещият се е поставен на случайно генериран път. Движещият се противник е моделиран по образец на наличен в търговската

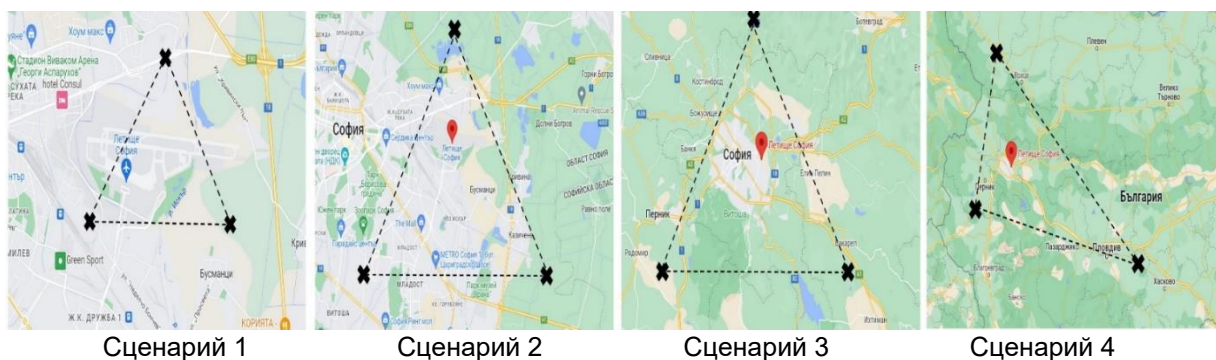
мрежа дрон. Генерираният произволен път използва постоянна скорост от 80 км/ч и винаги започва излъчването си от същия източник като стационарния противник.

Във всяка точка от потока от данни ADS-B моделът сравнява изчисленото местоположение на MLAT и докладваното местоположение на ADS-B. Ако разликата между двете точки е по-голяма от конкретния праг за маркиране, тогава моделът ще маркира данните за местоположение като подозрителни.

След като симулацията предостави всички данни за местоположението, ефективността е измерена като двоична скала (1 = маркирано успешно, 0 = неуспешно маркирано).

План на симулацията Настройката за всеки сценарий на симулацията е идентична с изключение на местоположението на приемните кули. Тази отделна променлива беше модифицирана, за да се определи какъв вид насоченост може да бъде извлечена, когато местоположенията на кулите са променени. Въз основа на триъгълния характер на конфигурацията, най-простата форма за създаване беше равностранен триъгълник, който се центрира около центъра на LBSF. Сценарий 1 – 3 остана в съответствие със същата форма, но се увеличи общия размер на триъгълника, за да се наблюдава как се променя грешката на измерване на модела. Сценарий 4 се отклони от тенденцията на формата чрез моделиране на по-вероятна топология чрез поставяне на кулите на 3 летища в България: Фиг. 6. Както се вижда на фигурата, това доведе до промяна формата на създадения триъгълник и общия размер.

Всяка топология служи като базова линия, за да се определи грешката на измерване на модела и прагът на маркиране, който беше изчислен, за да се определи производителността по време на добавянето на противника.



Фигура 6: Топология на приемните кули

Заклучение:

В заключение може да се каже, че е предложен иновативен метод за валидиране на ADS-B сигнали чрез използване на многопозиционна радиолокация. За целта е създадена среда за симулация и софтуерен пакет в MATLAB. В симулационната среда се моделира базова ситуация, която определя разстоянието до входящ ЛА по известна траектория за подход към летището, и ситуация с добавяне на противник. Избрано е международно летище Васил Левски - София (LBSF) и публикувана траектория за подход (MOREK 4H), за реален сценарий при кацане с две величини на данните за местоположението на летателния апарат. Извършен е преглед на симулацията за валидиране на ADS-B сигнали чрез използване на многопозиционна локация. Избрано е летище и траектория за подход, както и е направен избор за топология на приемните ADS-B кули. Взети са предвид и са изчислени стандартните отклонения от смущенията в GPS местоположението и времевия сигнал.

Благодарности.

Научните изследвания и резултатите в настоящата публикация са финансирани от проект по НИС на ТУ – София - 2024 г. „В помощ на докторанта“ № 242ПД0018-04

Литература:

1. M. Richards, J. Scheer and W. Holm, Principals of Modern Radar, Edison: SciTech Publishing, 2010.
2. Зависимые кооперативные системы ADS-C и ADS-B// Портал магистров Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/ind/index.ht>
3. Режим S//Тема Режим S [Электронный ресурс]. URL: <http://nenuda.ru/тема-14-режим-s-вопр.html>

4. Система и способ обеспечения безопасности полетов и/или управления полетами ЛА / Patent US2471245, Ломенхофер Хельмут, Нойфельдт Хольгер, 27.12.2012, 4-5 с.
5. What is the difference between ADS-B Out and ADS-B In? // The Balance, Aviation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thebalance.com/what-s-the-difference-between-ads-b-out-and-ads-b-in-282562>.
6. J. Sun, The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals, TU Delft OPEN Publishing, 2020.