
Резултати след симулативно изследване на метода за валидиране на ADS-B сигнали с използване 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 направен анализ и оценка на грешките, допускани при прилагане на метода за повишаване на точностните характеристики при измерване на разстоянието до ВС с използване на многопозиционна локация. Системата от този тип е отворена, което означава, че са възможни подобрения и по-нататъчно развитие. Ограничение на изследването е елиминирането на стойността на надморската височина (z). Чрез намаляване на информацията за местоположението до 2-D, системата е податлива на въздействие при вероятни „противници“, следващи същия маршрут, но на различна надморска височина. Изследването на триизмерния анализ би осигурило повече сигурност на метода за валидиране на многопозиционната локация. Но това ще изисква поне 4 сигнални кули, за да се синтезира допълнителната величина в пространството.

Results after a simulation study of the ADS-B signal validation method using multi-position location

Sofia Uzunova, Mihail Zhelyazov

Technical University of Sofia

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

Keywords: multi-position radar; published trajectory; approach to the airport; location data

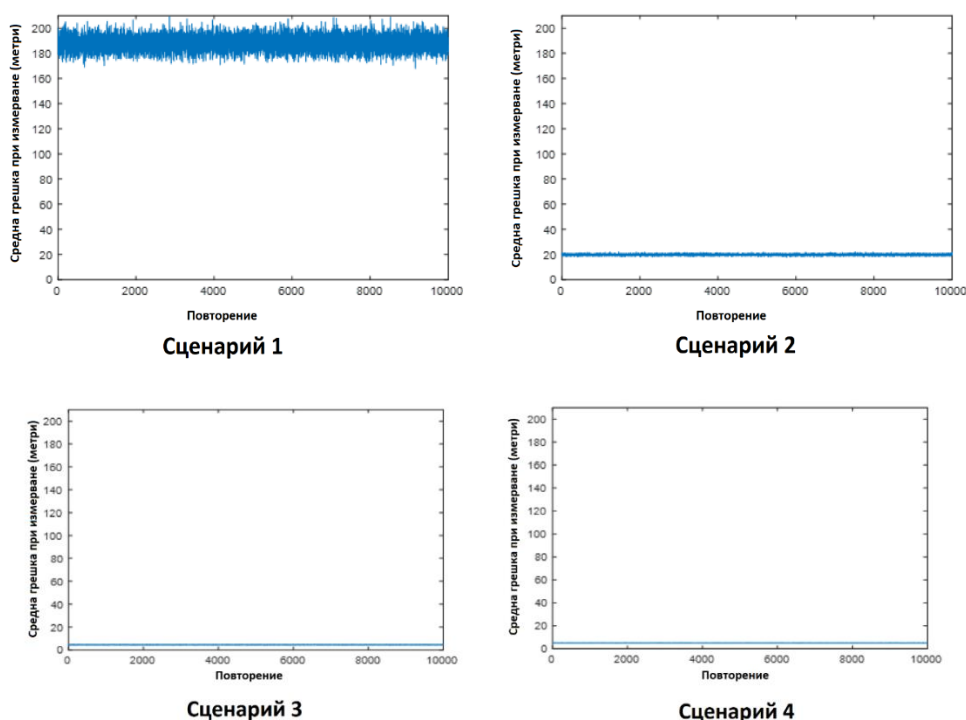
The report analyzes and evaluates the errors made when applying the method for increasing the accuracy characteristics when measuring the distance to the aircraft using multi-position location. The system of this type is open, which means that improvements and further development are possible. A limitation of the study is the elimination of the altitude value (z). By reducing the location information to 2-D, the system is susceptible to interference from potential "adversaries" following the same route but at a different altitude. The study of three-dimensional analysis would provide more certainty to the method for validating multi-position location. However, this would require at least 4 signal towers to synthesize the additional quantity in space.

Въведение:

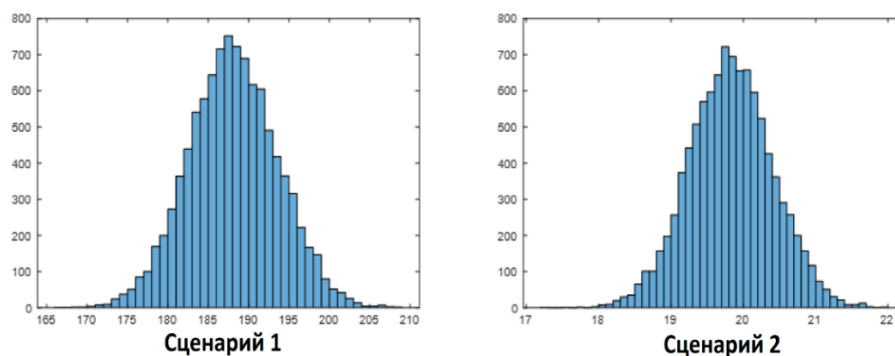
След като бяха изпълнени 10 000 повторения на всеки сценарий, средната грешка при измерване беше записана, за да се определи дали може да се извлече някаква тенденция. Фиг. 1 показва как всяко повторение на подхода към базовата линия варира в средната грешка на измерване. За допълнително илюстриране на разпределението на средната грешка при измерване е показана хистограма на Фиг. 2.

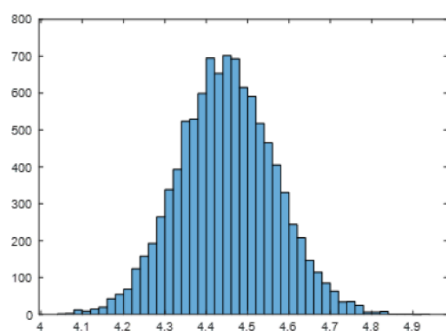
Изложение: Базова линия – резултати: Разпределението, което се вижда на фигура 2, е в съответствие с нормална камбанообразна крива или Гаусово разпределение на вероятностите, със средна стойност в центъра. Резултатите, показани в таблица 1, показват тенденция в средната грешка на измерване между сценарии 1, 2 и 3. Единствената модификация, направена между всяко от тези изпитвания, е размерът на триъгълника, образуван от приемните кули. Тези резултати показват, че тъй като кулите са били по-далеч една от друга, средната грешка при измерване е намалена.

В сценарий 4 приемните кули са поставени на 3 големи летища. Производителността на тази топология беше подобна на сценарий 3, но с малко по-висока средна грешка при измерване. Размерът на създадения триъгълник беше по-голям от всеки друг сценарий, но съдържаеше различна форма. Може да се приеме, че размерът на създадения триъгълник не е единственият фактор, който влияе върху изчислението при многопозиционната локация и върху формата.

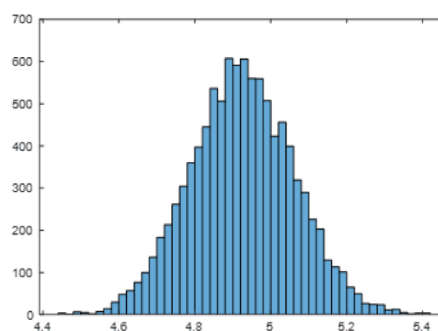


Фиг. 1: Средна грешка при измерване (метри) за повторение





Сценарий 3



Сценарий 4

Фиг. 2: Разпределение на средната грешка при измерване

Таблица 3: Резултати от грешка при измерване на базовата линия

Сценарий	Средна грешка при измерване (m)	Грешка при измерване Нормално отклонение (m)
1	188.08	5.54
2	19.83	0.58
3	4.45	0.12
4	4.92	0.14

Праг на маркиране – резултати: След като производителността на базовата линия беше характеризирана, средната грешка на измерване и нормалното отклонение бяха използвани за определяне на прага за маркиране, който ще се използва по време на частта за добавяне на противник на всеки сценарий. За да се определи праговата стойност, трябва да се установи 99% ниво на ефективност на базовата линия. Това би гарантирало, че ако действително въздухоплавателното средство пътува през въздушното пространство и докладва позицията си над ADS-B, тогава по-малко от 1% от точките с данни за местоположението му ще бъдат маркирани (т.е. фалшиви положителни резултати).

За да се определи прагът за маркиране, ще бъде добавено отместване към средната грешка на измерване въз основа на базовото разпределение на повторенията. Въз основа на разпределението на Гаус на данните за средната грешка на измерване беше създадено уравнение на Q-функция за определяне на приложимото отместване. Използвайки уравнение 3, алгоритъма на обратната Q-функция на MATLAB и известното стандартно отклонение (δ), беше създадено общо уравнение за определяне на прага на маркиране, както се вижда в уравнение 4.

$$(1) \quad 0.99 = 1 - Q\left(\frac{\text{изместване}}{\delta}\right)$$

$$Q\left(\frac{\text{изместване}}{\delta}\right) = 0.01$$

$$\frac{\text{изместване}}{\delta} = Q^{-1}[0.01]$$

$$\text{изместване} = \delta * Q^{-1}[0.01]$$

$$(2) \quad \text{праг за маркиране} = \text{средна грешка при измерване} + \text{изместване}$$

Чрез уравнение (2) са определени изместването и прагът за маркиране за всеки сценарий, показани в табл. 2. Тези стойности са основните резултати от анализа на базовата линия. Тези параметри позволиха на противниците да бъдат добавени в симулацията, за да се определи наистина дали MLAT може да бъде жизнеспособно средство за валидиране на данни за местоположението във въздуха от ADS-B предаване.

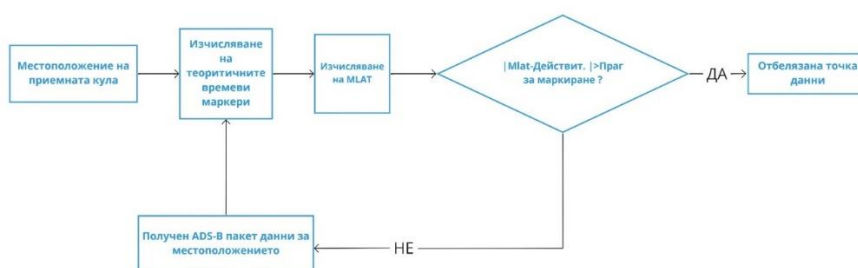
Таблица 4: Прагове за маркиране

Сценарий	Изместване на маркирането (в метри)	Праг за маркиране (в метри)
1	12.87	200.95
2	1.34	21.17

3	0.27	4.72
4	0.32	5.24

Добавяне на „стационарен противник“: След като прагът за маркиране за всеки модел/сценарий беше определен, производителността на системата може да бъде проучена чрез добавяне на противник, както е показано на Фиг.3. Първо, стационарният противник беше проучен чрез създаване на противник на 10 км северно от центъра на LBSF. Това местоположение е избрано, защото е извън периметъра на LBSF, в леснодостъпна зона за всеки. След това всеки сценарий беше синтезиран с произхода на сигнала на ADS-B предаването, излъчвано от местоположението на стационарния противник [1.2]. Моделът сравнява изчисленото местоположение на многопозиционната радиолокация с излъченото местоположение на ADS-B и ако двата източника варират с повече от прага за маркиране на сценария, тогава точката от данни ще бъде маркирана като подозрителна.

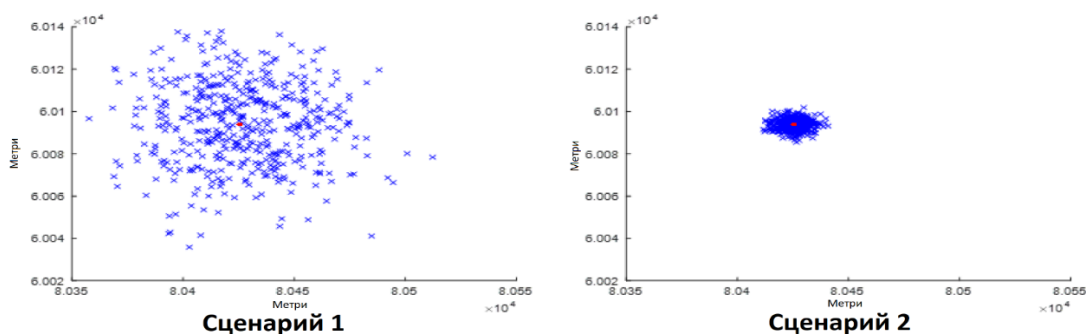
В края на постановката беше определена стойността на „ефективност на покритие“ въз основа на количеството маркирани точки от данни спрямо общия брой точки. Тъй като всички данни се излъчват от местоположението на противника, тогава моделът трябва да маркира всички точки от данни за пълно покритие.

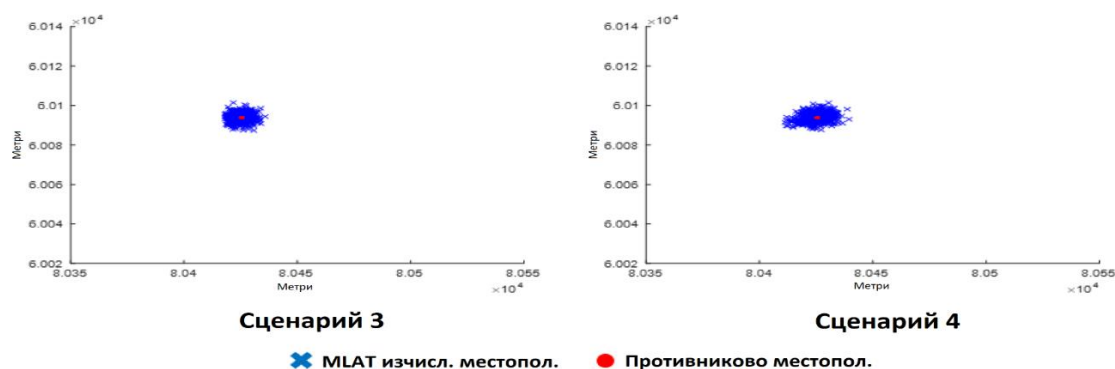


Фиг.3. Блок-схема на алгоритъма при добавяне на стационарен „противник“.

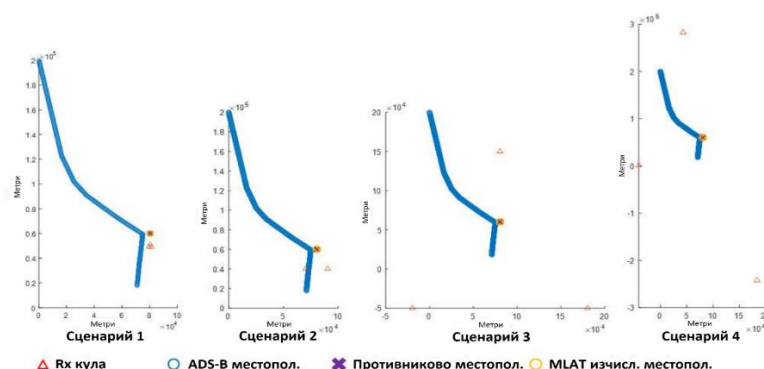
Фиг.4. показва местоположението на изчислението при многопозиционна локация - в синьо, спрямо действителното местоположение на „противника“ - в червено. Фиг.5 илюстрира пълният сюжет на симулацията, включително излъчената траектория на подхода - в синьо, местоположенията на приемната кула - в червено, действителното местоположение на противника в лилаво и местоположението на изчисления сигнал в жълто. Следователно Фиг. 4 е увеличените данни на лилавите и жълтите точки с данни на Фиг. 5. Трябва да се отбележи, че в Сценарий 1 приемните кули за многопозиционната локация са разположени достатъчно близо, за да изглеждат съвместно разположени. Това е само ограничение на графичния изход от симулацията и не отразява действителната настройка.

Фиг. 5 показва, че изчислените местоположения на многопозиционната локация не се припокриват с излъчената траектория на подхода в рамките на сценарии 1 – 2. Сценарии 3 – 4 показват известно припокриване, но най-вероятно то е причинено от ограничение в пропорцията на чертане на MATLAB. За обективно определяне на ефективността на покритието на системния модел бе завършено сравнението на праговете за маркиране.





Фиг.4. Местоположение на „противника“ спрямо MLAT местоположението.



Фиг.5. Пълна диаграма при добавяне на „стационарен противник“.

Таблица 5 показва ефективността на покритието на всеки сценарий за добавяне на стационарен противник. Тъй като данните за местоположението на ADS-B се излъчват от местоположение, което е различно от излъченото местоположение, се очаква всички точки от данни да бъдат маркирани, което съответства на 100% ефективност на покритие. Всички сценарии 1 – 4 успяха да осигурят 100% покритие при идентифициране на фалшиви данни за местоположение с помощта на MLAT.

Таблица 5: Покритие при стационарен противник

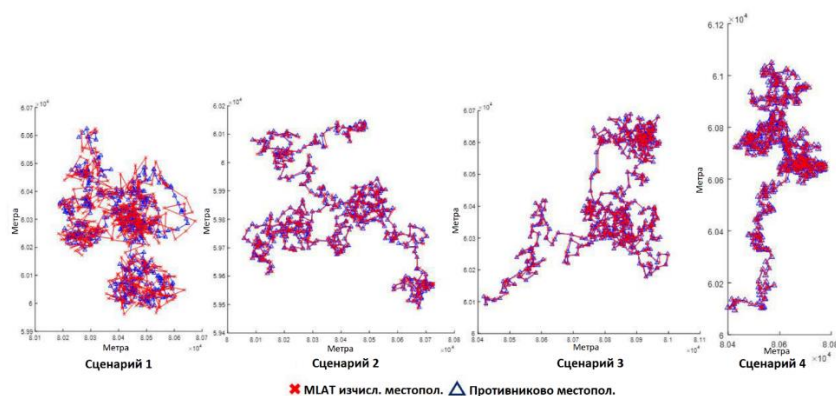
Сценарий	Точки за данни от местопол.	Подправени точки	Маркирани точки от данни	Ефективност на покритие (%)
1	485	485	485	100
2	485	485	485	100
3	485	485	485	100
4	485	485	485	100

Резултати при „движещ се противник“: Подобно на „стационарния противник“, маркиращите прагови стойности са използвани за измерване на ефективността на модела спрямо движещ се противник. Противникът е моделиран като лице, което е модифицирало наличен в търговската мрежа дрон, който да позволи мобилно ADS-B излъчване. Пътят на дрона е моделиран като случаен с постоянна скорост от 22 m/s (80 kmh).

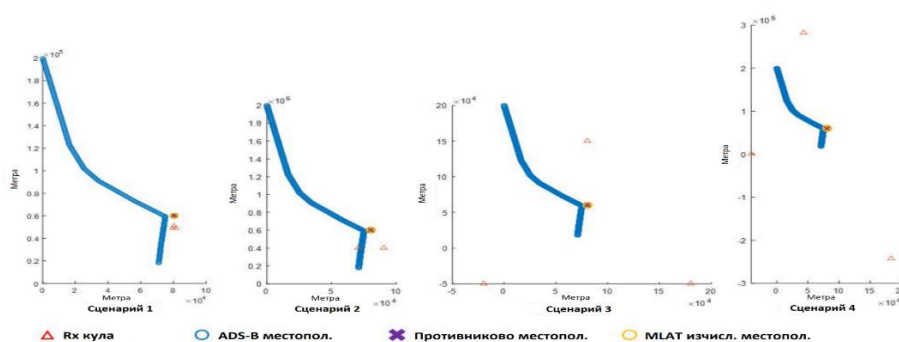
Фиг.6 показва връзката между действителното местоположение на движещия се противник спрямо изчисленото местоположение, предоставено от алгоритма MLAT. Сценарии 1 – 3 демонстрират намаляването на средната грешка при измерване на всеки опит чрез припокриване на точките от данни във всяка диаграма. Сините триъгълници представляват действителното местоположение на противника, а червените X представляват изчисленото местоположение на функцията MLAT. Между всеки сценарий точките от данни започват да се сближават и почти се припокриват при сценарий 3. Сравнението между действителното и изчисленото местоположение в сценарий 4 е почти идентично със сценарий 3. Както се очаква, това се основава на средната грешка на измерване на двата сценария, които са почти равни.

Фиг.6 илюстрира пълния план на симулацията, включително излъчената траектория на подхода в синьо, местоположенията на приемната кула в червено, действителното местоположение на противника в лилаво и местоположението на изчисления сигнал в жълто. Като при резултатите от стационарен противник, Фиг.6. е увеличените данни на лилавите и жълтите точки от данни на Фиг. 7.

Фиг.7 показва, че изчислените местоположения на MLAT не се припокриват с излъчваната траектория на заход в рамките на сценарии 1 – 2. Подобно на добавянето на стационарен противник, сценарии 3 – 4 показват известно припокриване, но най-вероятно е причинено от ограничение в съотношението на графиката. Сравнението на маркирания праг отново беше завършено, за да се определи обективно ефективността на покритието на системата.



Фиг.6: Действително местоположение спрямо MLAT изчислено местоположение на движещ се противник



Фиг.7: Пълна диаграма при добавяне на „движещ се противник“.

Таблица 6 показва ефективността на покритието на всеки сценарий, когато движещ се противник е добавен в системата. Тъй като сигналът ADS-B произлиза от местоположение, различно от местоположението на излъчване, се очаква всички точки от данни да бъдат маркирани, което съответства на 100% ефективност на покритие. Използвайки MLAT, системният модел успя да осигури 100% покритие при идентифициране на фалшиви данни за местоположение в рамките на сценарии 1 – 4.

Таблица 6: Покритие при движещ се противник

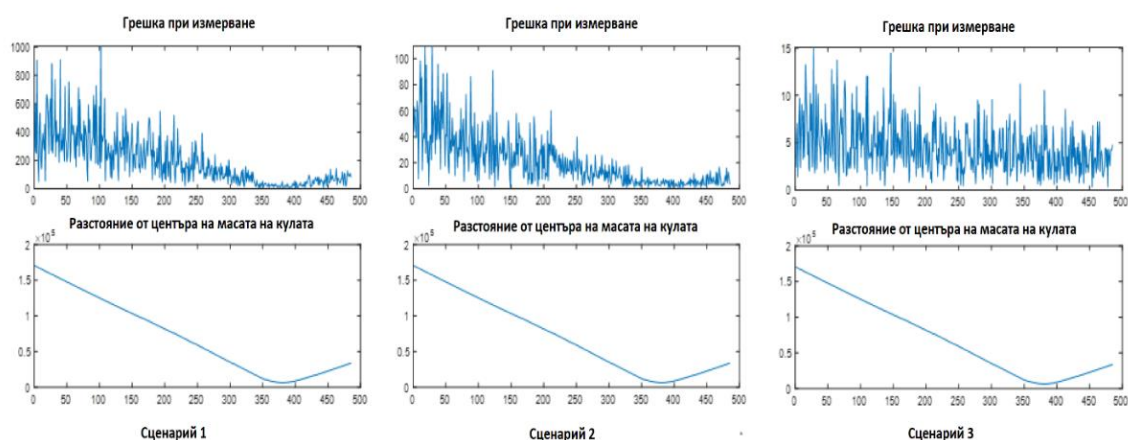
Сценарий	Точки за данни от местопол.	Подправени точки	Маркирани точки от данни	Ефективност на покритие (%)
1	485	485	485	100
2	485	485	485	100
3	485	485	485	100
4	485	485	485	100

Трябва да се отбележи, че местоположението на противника никога не е било съвместно с данните за местоположението на ADS-B, които се излъчват. Ако тази ситуация беше представена и местоположението на противника беше в рамките на прага за маркиране, тогава нямаше да бъде маркирано правилно. Тази ситуация не е наблюдавана, тъй като стационарният противник

ще има само една точка от данни, която няма да бъде маркирана правилно, т.е. когато местоположението на ADS-B е в обсега с действителното местоположение на противника [3.4].

До този момент СУВД щеше да маркира фалшивия самолет поради предварително маркираните точки от данни в рамките на неговия път на подход. Освен това движението се противник би имал подобна производителност въз основа на ограничената скорост на дрона (22 м/с). Въз основа на началната скорост на подхода (107 м/с) и крайната скорост на подхода (72 м/с) на търговски самолет и скоростта на предаване от 2 Hz, ще бъдат получени само 1-2 точки от данни за местоположение, които няма да бъдат отбелязани. Единственият реалистичен начин, по който дрон може да заблуди системата, е да се движи по излъчвания си път със скорост, близка до тази на търговски самолет.

И накрая, поради силно повтарящият се характер на симулацията, бяха наблюдавани само малко количество топологии на кули. Въз основа на Сценарий 1-3, който съдържа конфигурация на равностранен триъгълник, има силна зависимост между разстоянието от центъра на масата на кулата и грешката на измерване, както е показано на Фигура 19. Освен това, тъй като разстоянието между кулите е увеличено в рамките симулацията, средната грешка при измерване намалява. Въз основа на тези два резултата може да се заключи, че вероятно има идеално разстояние между кулите, което ще доведе до най-малко количество грешки и с център на масата около източника на получения сигнал.



Фиг.8: Грешка при измерване и съотношение на разстоянието от центъра на кулата.

Заклучение:

Базовият симулационен модел предостави средна грешка при измерване между 188,08 и 4,45 метра. Чрез симулиране на базовата настройка в продължение на хиляди повторения беше създадено разпределение на производителността, за да се определи каква стойност ще се използва, за да се позволи 99% точност при откриването на подозрителни сигнали. След като тази стойност беше определена, тя беше използвана в сценарии за добавяне на противник и успя да коригира идентифицирането на подозрителни сигнали в 100% от времето, както се вижда в таблица 7. Въз основа на тези резултати MLAT е обещаващо средство за валидиране на местоположението на ADS-B данни. Въз основа на работата на симулирания модел може да се приеме общо правило.

Таблица 7: Резултати от ефективността на симулацията

Сценарий	Средна грешка при измерване (m)	Грешка при измерване, стандартно отклонение (m)	Праг за маркиране (m)	Ефективност на маркиране на противник (%)
1	188.08	5.54	200.95	100
2	19.83	0.58	21.17	100
3	4.45	0.12	4.72	100
4	4.92	0.14	5.24	100

Извод: Освен ако местоположението на противника, независимо дали е неподвижен или се движи, не е в рамките на праговото ниво на маркиране на излъчената ADS-B точка от данни, тогава моделът ще го маркира по подходящ начин. Дали противникът се движи по подобен път, или е неподвижен, няма отношение към модела, тъй като той приема всяка точка от данни като независимо изчисление, за да определи валидността.

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-вопл.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.