



الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم الاتصالات

تصميم نظام تحديد مواقع أهداف جوية عن طريق حساب الفروقات

الزمنية للوصول (TDOA (Time Difference Of Arrival)

قُدِّمت هذه الدراسة لنيل درجة الماجستير في هندسة الاتصالات

تقديم

محمد حسام السقا

بإشراف

د. محمد زيواني

تشرين الثاني 2016

هنا تخشع الكلمات إجلالاً لعظيم فضلها

وتنهارُ أبيات الشعرِ أمامَ عطاءِ حبِّهما

إلى أعظم شخصين أمدَّاني بعونهما

إلى من تعلق فؤادي برؤياها

إلى أعظم نعمةٍ آتاني الله إياها

أمِّي الغالية

إلى الغالي والقريب

إلى من كان التراب تحت قدميه لي شرفاً وطيب

رفيق دربي ... والدي الحبيب

إلى فرحي ومسرتي

إلى أحلى زهرةٍ في دنيتي

إلى أمِّ أبنائي وروضةٍ مهجتي

زوجتي حبيبي

إلى من هم سبب سعادتي ووجودي

فرحةٌ عمري ... إبني وابنتي

محمد حسام السقا

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه

الحمد لله على ما آتانا من فضله وما وفقنا إليه

قد تطول قائمة الشكر لمن لم ييخلوا عليّ بما أعطاهم الله وأمدهم من علمه
أستهل شكري للأستاذة الأفاضل الذين لم يترددوا بمساعدتي عندما احتجتهم

مازن الرّيس، أحمد شنشو، هيثم البهنسي

أشكر أيضاً د. رضوان قسطنطين لما قدّم لي من عون عند حاجته

الشكر الكبير لمعلمي وأستاذاي ومرشدي

د. محمد زيواني

لما قدمه لي من خبرات متنوّعة طيلة فترة العمل

لهم منّي كل الشكر والامتنان

المحتويات

iii	فهرس الأشكال.....
v	فهرس الجداول.....
vi	الاختصارات المستخدمة.....
vii	الخلاصة.....

الفصل الأول: مقدمة عامة

2	1.1. تمهيد.....
4	2.1. لمحة تاريخية عن نظام MLAT.....
6	3.1. الهدف من العمل.....
7	4.1. حول الأطروحة.....

الفصل الثاني: أنظمة السطع متعددة المستقبلات

9	1.2. تقنيات السطع المستخدمة في أنظمة التحكم بالملاحة الجوية.....
10	1.1.2. رادار السطع الأوّلي PSR.....
10	2.1.2. رادار السطع الثانوي SSR.....
11	3.1.2. رادار SSR بالنمط (S) Select.....
11	4.1.2. نظام بث السطع الآلي المستقل ADS-B.....
12	2.2. نظام متعدد المستقبلات MLAT.....
14	1.2.2. تطبيقات MLAT.....
15	3.2. مبدأ عمل MLAT.....
18	4.2. الفرق الزمني للوصول TDOA.....
19	5.2. مُعامل MLAT.....
20	1.5.2. أخطاء القياس.....
21	2.5.2. أثر الهندسة الجغرافية للنظام على أخطاء القياسات.....
22	3.5.2. إجراءات تحديد الموقع.....
23	6.2. الإشارات المستخدمة في أنظمة MLAT.....
23	1.6.2. إشارات نظام SSR.....
24	2.6.2. إشارات SSR النمط S.....

الفصل الثالث: طرق تقدير الموقع في أنظمة MLAT السليّة

27	1.3 تمهيد.....
27	2.3 المبادئ الأساسية لتقدير موقع هدف اعتماداً على قياسات TDOA.....
30	3.3 تقدير LS.....
30	1.3.3 تقدير LS الخطّي (LLS) Linear LS.....
32	4.3 إجراءات تحديد الموقع.....
33	5.3 نماذج المعطيات الإحصائية.....
33	1.5.3 التقدير باستخدام سلاسل تايلور.....
35	6.3 نماذج المعطيات الجبرية.....
38	7.3 نماذج المعطيات العددية.....
39	1.7.3 إجراءات Friedlander.....
42	2.7.3 إجراءات Chan and Ho.....
46	8.3 قياس دقة إجراءات تحديد الموقع.....
46	1.8.3 CRLB وقياس الخطأ التريبيعي.....

الفصل الرابع: المحاكاة والنتائج

48	1.4 تمهيد.....
51	2.4 إجراءات Foy.....
54	3.4 إجراءات Chan and Ho.....
56	4.4 إجراءات Friedlander.....
59	5.4 إجراءات Bancroft.....
60	6.4 نظام MLAT سلمي بثلاث مستقبلات لتحديد موقع هدف بثلاث أبعاد.....
60	7.4 التخلص من الالتباس بين إشارات النمطين A و C.....
61	1.7.4 تصحيح موقع الهدف.....
64	2.7.4 طريقة أولى لإزالة الالتباس.....
69	3.7.4 طريقة ثانية لإزالة الالتباس.....
70	8.3 دراسة أثر دقة ساعة النظام على إجراءات تحديد الموقع.....
75	الخاتمة والآفاق المستقبلية.....
78	المراجع.....

فهرس الأشكال

3	.....	التطور الزمني لأنظمة السطع الجوي	الشكل 1-1 :
4	.....	مقارنة الدقة التي تؤمنها أنظمة السطع المختلفة	الشكل 2-1 :
4	.....	نظام تحديد الموقع الصوتي القطعي	الشكل 3-1 :
6	.....	انتشار نظام السطع MLAT حول العالم حتى عام 2010	الشكل 4-1 :
9	.....	أنظمة السطع العالمية	الشكل 1-2 :
10	.....	مبدأ عمل نظام PSR	الشكل 2-2 :
11	.....	مبدأ عمل نظام رادار السطع الثانوي SSR	الشكل 3-2 :
12	.....	مبدأ نظام بث السطع الآلي المستقل ADS-B	الشكل 4-2 :
13	.....	نظام MLAT بأربع محطات استقبال	الشكل 5-2 :
14	.....	أهم تطبيقات نظام MLAT	الشكل 6-2 :
16	.....	المحل الهندسي لمجموعة مواقع الهدف والتي لها نفس TDOA لمحطتي استقبال	الشكل 7-2 :
		تحديد موقع هدف عبر تقاطع ثلاث قطوع زائدة (أربع محطات استقبال)	الشكل 8-2 :
16	.....	
17	.....	تحديد موقع هدف ببعدين	الشكل 9-2 :
		تمثيل جغرافي لمعامل DOP من أجل (أ) محطتي استقبال متباعدتين فيما بينهما، (ب) محطتي استقبال متقاربتين	الشكل 10-2 :
22	.....	
24	.....	بنية إشارة جواب نظام SSR	الشكل 11-2 :
24	.....	بنية إشارة جواب النمط S	الشكل 12-2 :
25	.....	الصيغ المختلفة لإشارة جواب النمط S	الشكل 13-2 :
28	.....	المخطط العام لنظام متعدد المستقبلات MLAT	الشكل 1-3 :
41	.....	مواقع محطات الاستقبال في نظام Fang	الشكل 2-3 :
49	.....	أثر تغير مواقع المستقبلات على معيار CRLB	الشكل 1-4 :
50	.....	أثر تغير عدد المستقبلات على معيار CRLB	الشكل 2-4 :
52	.....	أداء إجرائية Foy من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 502)	الشكل 3-4 :
52	.....	أداء إجرائية Foy من أجل 4 محطات استقبال (PDOP = 491)	الشكل 4-4 :
53	.....	أداء إجرائية Foy من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 4678)	الشكل 5-4 :
54	.....	أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 4 محطات استقبال (PDOP = 491)	الشكل 6-4 :

55	.....(PDOP = 502) محطات استقبال	الشكل 7-4 : أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 3 محطات استقبال
55	.....(PDOP = 4678) محطات استقبال	الشكل 8-4 : أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 3 محطات استقبال
56	.....(PDOP = 222) محطات استقبال	الشكل 9-4 : أداء إجرائية Friedlander من أجل 5 محطات استقبال
56	.....(PDOP = 207) محطات استقبال	الشكل 10-4 : أداء إجرائية Friedlander من أجل 6 محطات استقبال
57	.....(PDOP = 1984) محطات استقبال	الشكل 11-4 : أداء إجرائية Friedlander من أجل 5 محطات استقبال
57	.....(PDOP = 1970) محطات استقبال	الشكل 12-4 : أداء إجرائية Friedlander من أجل 6 محطات استقبال
58	.....(PDOP = 502) Fang	الشكل 13-4 : أداء إجرائية Fang
58	.....(PDOP = 4678) Fang	الشكل 14-4 : أداء إجرائية Fang
59	.....(PDOP = 492) Bancroft	الشكل 15-4 : أداء إجرائية Bancroft
59	.....(PDOP = 2954) Bancroft	الشكل 16-4 : أداء إجرائية Bancroft
61	.....الهدف	الشكل 17-4 : الخطأ في الإحداثية x عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف
62	.....الهدف	الشكل 18-4 : الخطأ في الإحداثية y عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف
62	.....ارتفاعه	الشكل 19-4 : خطأ إحداثيات الهدف الناتج عن ارتفاعه
64	.....(and Ho	الشكل 20-4 : الخطأ في الإحداثية x عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف (إجرائية Chan and Ho)
64	.....(and Ho	الشكل 21-4 : الخطأ في الإحداثية y عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف (إجرائية Chan and Ho)
66	.....المقترحة	الشكل 22-4 : المخطط التدفقي لطريقة إزالة الالتباس المقترحة
67	.....(50,25) Km	الشكل 23-4 : الخطأ في الإحداثية x من أجل هدف يبعد عن النظام (50,25) Km
68	.....(50,25) Km	الشكل 24-4 : الخطأ في الإحداثية y من أجل هدف يبعد عن النظام (50,25) Km
68	.....(350,225) Km	الشكل 25-4 : الخطأ في الإحداثية x من أجل هدف يبعد عن النظام (350,225) Km
69	.....(350,225) Km	الشكل 26-4 : الخطأ في الإحداثية y من أجل هدف يبعد عن النظام (350,225) Km
71	.....	الشكل 27-4 : واجهة التخاطب

فهرس الجداول

26	.....S استخدامات إشارات جواب النمط	: الجدول 1-2
32	..... مقارنة بين مقدّرات تحديد الموقع المختلفة	: الجدول 1-3
49	..... قيمة PDOP لنظام MLAT من أجل تشكيلات مختلفة لمحطّات الاستقبال	: الجدول 1-4
50	..... مواقع محطّات الاستقبال	: الجدول 2-4
51	..... علاقة PDOP بعدد محطّات النظام	: الجدول 3-4
53	..... عدد التكرارات المطلوبة لتقارب Foy من أجل تقدير أولي هو نفسه موقع الهدف	: الجدول 4-4
66	..... مثال عددي لإزالة الالتباس بالاعتماد على الطريقة المقترحة	: الجدول 5-4
70	..... مثال عددي لإزالة الالتباس بالاعتماد على تتابع عدة إشارات	: الجدول 6-4
71	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 20 ns لهدف قريب و5 مستقبلات	: الجدول 7-4
72	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 20 ns لهدف بعيد و5 مستقبلات	: الجدول 8-4
72	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 10 ns لهدف قريب و5 مستقبلات	: الجدول 9-4
72	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 10 ns لهدف بعيد و5 مستقبلات	: الجدول 10-4
73	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 5 ns لهدف قريب و5 مستقبلات	: الجدول 11-4
73	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 5 ns لهدف بعيد و5 مستقبلات	: الجدول 12-4
73	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 5 ns لهدف قريب و3 مستقبلات	: الجدول 13-4
73	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 5 ns لهدف بعيد و3 مستقبلات	: الجدول 14-4
74	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 10 ns لهدف قريب و3 مستقبلات	: الجدول 15-4
74	..... أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 10 ns لهدف بعيد و3 مستقبلات	: الجدول 16-4

ADS	Automatic D ependent Surveillance
ADS-B	Automatic D ependent Surveillance B roadcas
ATC	Air T raffic C ontrol
ATCBS	Air T raffic C ontroller B eacon S ystem
AOA	A nge O f A rrival
CRLB	C ramer- R ao L ower B ound
DOP	D ilution O f P recision
FIM	F isher I nformation M atrix
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystem
HDOP	H orizontal D OP
ICAO	I nternational C ivil A viation O rganization
LLS	L inear L S
LS	L east S quar
LORAN	L ong R ange N avigation
ML	M aximum L ikelihood
MLAT	M ultilateration
MSE	M ean S quare E rror
PSD	P ower S pectral D ensity
PSR	P rimary S urveillance R adar
PDOP	P osition D OP
RTD	R ound T rip D elay
SSR	S econdary S urveillance R adar
SI	S pherical- I nterpolation
SX	S pherical- I ntersection
TCAS	T raffic alert and C ollision A voidance S ystem
TDOA	T ime D ifference O f A rrival
VDOP	V ertical D OP
WLS	W eighted L S

الخلاصة

تركز هذه الدراسة بشكل عام على أحد أهم أنظمة السطع الجويّ ألا وهي أنظمة السطع متعدّدة المستقبلات، حيث تعرض نظرة شاملة على أهم خصائص الأنظمة متعددة المستقبلات، ونقاط قوّة هذه الأنظمة بالمقارنة مع أنظمة السطع الجويّ الأخرى. تتناول الدراسة بشكل رئيسي إجراءات تحديد الموقع المستخدمة في هذه الأنظمة.

إنّ الهدف الأساسي من إجراءات تحديد الموقع هو الاستفادة من إشارات الهدف (الطائرة) المستقبلية في محطّات النظام لتحديد موقع ذلك الهدف. وتتّوّع الإجراءات تبعاً للخصائص الفيزيائية للإشارة المنبعثة عن الهدف والتي تقوم إجراءات تحديد الموقع باستخدامها في عملية تقدير الموقع. تعتبر الفروقات الزمنية للوصول أحد أهم الخصائص التي يمكن استخدامها لتحديد موقع الهدف وهو ما تركّز عليه هذه الدراسة. حيث تستعرض الطرق والإجراءات المختلفة التي تقوم بتحديد الموقع وفقاً لقياسات الفروقات الزمنية للوصول. بالإضافة إلى المقارنة بين هذه الإجراءات من عدة مناحي وهي عدد مستقبلات النظام الكلّي، والتعقيد الحسابي، والهندسة الجغرافيّة للنظام. ويقصد بالهندسة الجغرافيّة للنظام أماكن توضع محطّات الاستقبال بالنسبة لمجال تغطية النظام. ويصب كل ذلك في مجال إمكانيّة التحقيق العتادي لإجراءات تحديد الموقع.

الفصل الأول

مقدمة عامة

1.1. تمهيد:

تمّ تصنيع أول طائرة في القرن التاسع عشر ومنذ ذلك الوقت وعدد الطائرات التي تحلّق جوّاً يزداد يوماً بعد يوم، حيث وصل عددها في عام 2006 إلى حوالي 28 مليون طائرة [01]. تتطلب هذه الزيادة تأمين مسارات جويّة آمنة بحيث تسمح لأكثر عدد ممكن من الطائرات أن تشغل الجو في الوقت نفسه وبشكل يضمن سلامة جميع الطائرات. تعتبر أنظمة السطح المسؤولة الأولى عن تأمين متطلبات السلامة الجويّة. حيث تقوم هذه الأنظمة بمتابعة موقع الرحلة الجويّة للطائرة ومساها ضمن مجال تغطيتها بشكل مستمر. وبالتالي كلّما كانت دقّة تحديد الموقع أكبر كلّما كان بالإمكان زيادة الكثافة الجويّة بشكل أكبر.

يمكن تصنيف أنظمة السطح والتحكم بالحركة الجويّة بناءً على دور الهدف في تحديد موقعه إلى صنفين:

- أنظمة تعاونيّة: يتم فيها حساب موقع الهدف اعتماداً على إشارات مُرسلة من الهدف نفسه.
- أنظمة غير تعاونيّة: يتم فيها حساب موقع الهدف دون الاعتماد على إشارات مُرسلة من الهدف.

كما يمكن تصنيف هذه الأنظمة وذلك حسب البنية التي يجري فيها حساب موقع الهدف إلى:

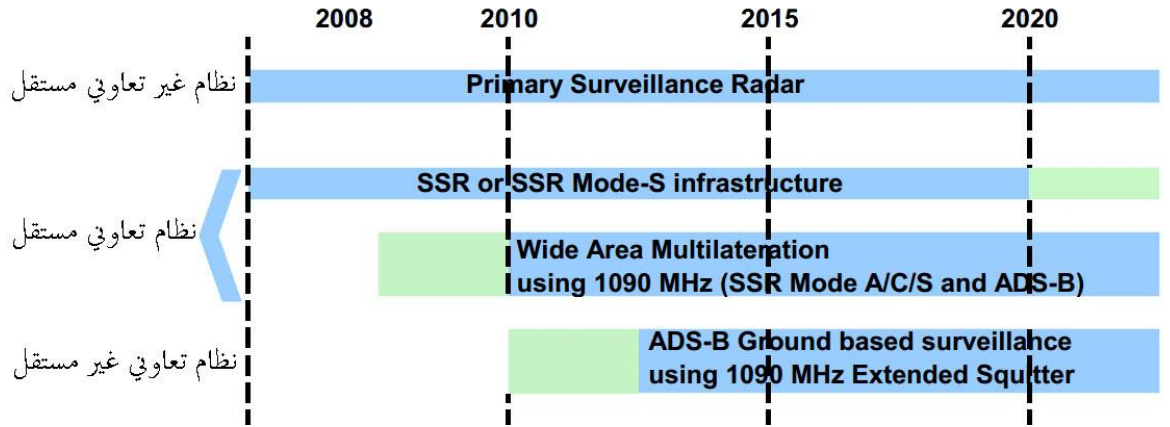
- أنظمة مستقلة: يتم فيها حساب الموقع في النظام.
- أنظمة غير مستقلة: يتم فيها حساب الموقع في الهدف نفسه.

وعلى ضوء التصنيفات السابقة يوجد ثلاث فئات رئيسة مختلفة لأنظمة السطح [02]:

أ. نظام غير تعاوني مستقل لملاحقة جميع الأهداف. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام رادار السطح الأولي (الرادار الأساسي) (Primary Surveillance Radar (PSR)، وهو أقدم نظام سطح مستخدم. وعلى الرغم من كون PSR أقل فعالية من أنظمة السطح الأخرى إلا أنّه السبيل الوحيد لاكتشاف الأهداف في حال فشل التجهيزات الإلكترونيّة لتلك الأنظمة.

ب. نظام تعاوني مستقل لملاحقة الأهداف الجويّة المساهمة في تحديد موقعها. يعتبر رادار السطح الثانوي Secondary Surveillance Radar (SSR) أول نظام سطح يعمل ضمن هذه الفئة. وقد ظهر حديثاً نظام متعدّد المستقبلات Multilateration (MLAT) والذي بإمكانه أن يحلّ محلّ نظام SSR.

ج. نظام تعاوني غير مستقل بحيث يجري حساب معلومات الموقع للهدف ضمن الهدف نفسه عوضاً عن تقديرها في محطة الاستقبال الأرضيّة. يدعم هذه الفئة نظام السطح الآلي (ADS) Automatic Dependent Surveillance.

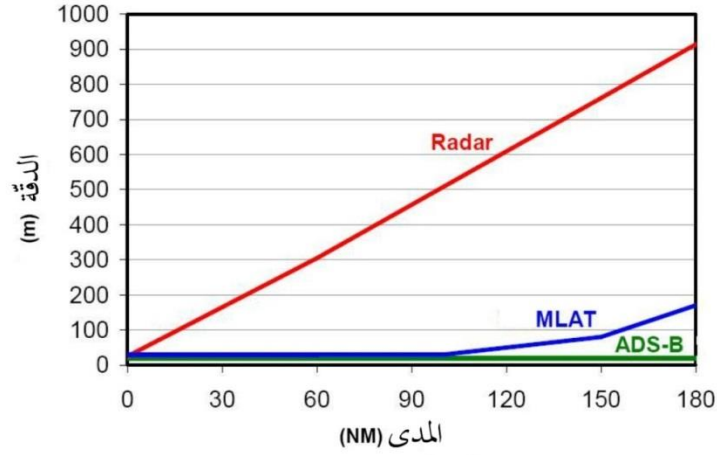


الشكل 1-1: التطور الزمني لأنظمة السطح الجوّي [02].

يجري التركيز في هذه الأطروحة على أنظمة السطح التعاونيّة المستقلّة وتحديدًا نظام السطح متعدّد المستقبلات MLAT.

وبالنظر إلى عدد الأبحاث التي تهتم بنظام MLAT نرى أنها في تزايد مستمر منذ أواخر التسعينيات، وكما يوضح الشكل 1-1 فإنّ نظام MLAT (ADS-B) سيحل مكان نظام SSR ضمن فئة أنظمة السطح التعاوني المستقل وذلك بسبب انخفاض تكلفة MLAT مقارنةً بنظام SSR [03].

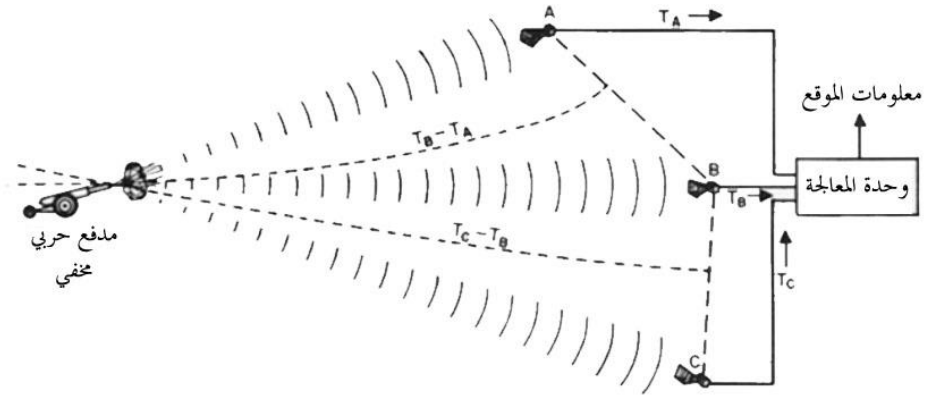
كما أنه إلى جانب تفضيل أنظمة MLAT على أنظمة SSR من ناحية الكلفة المادية فإنّها تتفوق عليها أيضاً من حيث الدقّة التي تؤمّنها (Accuracy) كما هو واضح في (الشكل 1-2). يضاف إلى ماسبق أنّ نظام MLAT يؤمن متطلبات أمان أفضل، ذلك أنه يعتمد في مبدأ عمله على عدّة مستقبلات وبالتالي إذا تعطلت بعض أجهزة النظام فإنه يتابع عمله على عكس SSR والذي في حال فشل الرادار في عمله أو احتياجه إلى صيانة فإنّ نظام السطح هذا يتوقّف بشكل كامل عن أداء وظيفته.



الشكل 2-1: مقارنة الدقة التي تؤمنها أنظمة السطع المختلفة [01].

2.1. لمحة تاريخية عن نظام MLAT:

عُرفت أنظمة MLAT، والمعروفة أيضاً بأنظمة تحديد الموقع القطعية، خلال فترة الحرب العالمية الأولى، حيث بُني أول نظام تحديد موقع بالاعتماد على تعدد المستقبلات وكانت الإشارات المستخدمة آنذاك إشارات صوتية. وقد اعتمد نظام تحديد الموقع الصوتي القطعي على قياس الفرق الزمني لوصول الإشارات الصوتية، وكان استخدامه محصوراً في تحديد مواقع المدافع الحربية المخفية في أرض المعركة (الشكل 3-1).



الشكل 3-1: نظام تحديد الموقع الصوتي القطعي.

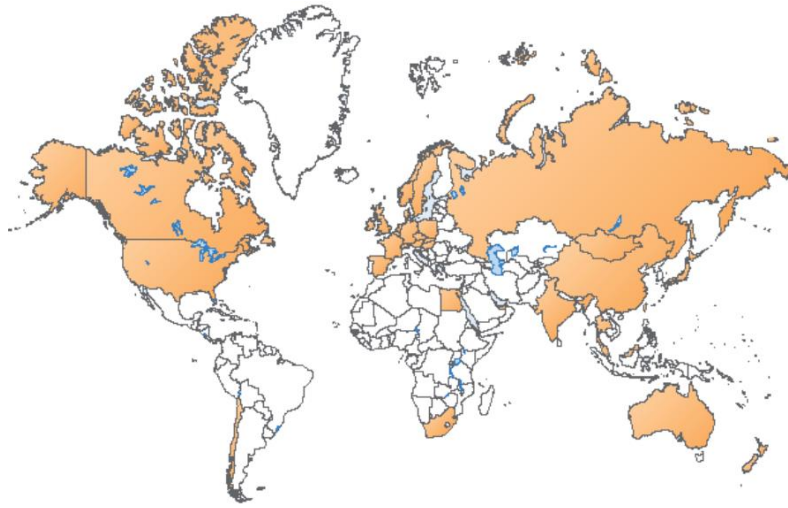
حيث يجري استقبال صوت الانفجار في محطات الاستقبال عبر مؤقت زميني. وتستخدم الأزمنة المقاسة في تحديد موقع المدفع بشكل يدوي. وقد كانت المحدودية الأساسية الموجودة في هذا النظام هي المدى القصير للأمواج الصوتية والدقة المنخفضة لجهاز المؤقت الزمني.

لاحقاً وخلال الحرب العالمية الثانية، جرى تطوير مولدات إشارات راديوية باستطاعة تصل إلى عدة كيلو واط بالإضافة إلى أجهزة قياس زمنية بدقة 1 ميكروثانية. بهذه المعدات وجدت أول أنظمة الملاحة القطعية والتي مهّدت الطريق لاحقاً لظهور أنظمة MLAT. من أهم الفروق الرئيسية بين أنظمة MLAT وأنظمة الملاحة القطعية هي أن حساب الموقع يتم في الهدف نفسه في أنظمة الملاحة القطعية، بينما يتم حساب موقع الهدف في أنظمة MLAT في المحطة المركزية وليس في الهدف، وهذا مشابه للمبدأ الذي قامت عليه أنظمة تحديد الموقع الصوتي القطعي.

كان النظام المدعو GEE من أوائل أنظمة الملاحة القطعية، وقد وضع قيد العمل بشكل كامل عام 1942م. واستخدم من قبل القوى الجوية الملكية البريطانية خلال الحرب العالمية الثانية. ومن الأنظمة التي اشتهرت حينها نظام (LORAN (Long Range Navigation)، والذي كان معمولاً به في ربيع عام 1943م. وقد تلا ذلك العديد من الأنظمة اللاحقة والمطورة مثل LORAN-B، LORAN-C، DECCA، OMEGA.

إنّ السبب الرئيسي وراء تطوير أنظمة MLAT كان بغرض الاستطلاع وذلك من أجل الحصول بشكل آلي على تعريف خاص بالهدف، بالإضافة إلى زيادة الدقة ومستويات التغطية. تُعد شركة Bendix أول من اختبر نظام MLAT في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1970م. يقوم هذا النظام باستجواب مباشر لجيب نظام التحكم بالملاحة الجوية Air Traffic Controller Beacon System (ATCBS)، الذي يجيب بدوره على الاستجوابات. ويجري تقدير زمن وصول الإجابات وتُرسل إلى حاسب مركزي يقوم بحساب موقع الهدف. يعتمد النظام في حساب موقع الهدف على إجراءات مشابهة لتلك المستخدمة في LORAN و GPS. وقد انحصرت اختبارات النظام على الأهداف السطحية في مطار لوغان الدولي في بوسطن، ماشوستس، الولايات المتحدة الأمريكية [04]. أظهرت نتائج هذه الاختبارات جدوى تنفيذ مثل هذه الأنظمة للسطح والتحكم بالملاحة الجوية. ومع ذلك، اعتُبر هذا النظام، في ذلك الوقت، بأنه مكلف للغاية، وقد تلا ذلك مجموعة من الاختبارات المختلفة لمعرفة ما إذا كانت أنظمة MLAT قابلة للعمل مع إشارات النمط S وإشارات نظام الإنذارات الجوية وتفاذي الاصطدام (Traffic alert and Collision Avoidance System (TCAS). وحملت النتائج الجديدة للاختبارات التي قام بها مختبر Lincoln عام 1986م مؤشرات إيجابية على إمكانية تطبيق هذه أنظمة MLAT مع هذه الإشارات بغرض السطح والتحكم بالملاحة الجوية [04].

جرى تبني نظام MLAT حول العالم وأصبح أكثر نمواً عالمياً في الآونة الأخيرة. وكانت الإدارة الجوية الفيدرالية للولايات المتحدة الأمريكية أول من تبني نظام MLAT وذلك عبر إطلاق نظام ASDE-X عام 2000م. حيث يقوم النظام بدمج الإشارات المرتدة من الرادارات الأولية مع المعلومات الواصلة له من مصفوفة حساسات حول المطار، وذلك للحصول على صورة كاملة للحركة الجوية المحيطة بالمطار. النظام (ASDE-X) مركب حالياً في معظم مطارات الولايات المتحدة الأمريكية [03]. يبين الشكل 4-1 الدول التي تبنت نظام MLAT وذلك حتى عام 2010. وقد نشرت المنظمة الأوروبية لسلامة الملاحة الجوية EUROCONTROL في تقريرها [05] أن أنظمة MLAT ستكون إحدى الركائز الأساسية في البنية التحتية لأنظمة التحكم بالملاحة الجوية بعد عام 2020.



الشكل 4-1: انتشار نظام السطع MLAT حول العالم حتى عام 2010 [03].

3.1. الهدف من العمل:

يهدف هذا العمل إلى دراسة المعاملات التي تدخل في تصميم نظام سطع سلمي متعدد المستقبلات، والتي تؤثر بشكل كبير على جودة أداء هذا النظام، حيث تتناول الدراسة أثر عدد المستقبلات المطلوبة، وطريقة التزامن بين المحطات المستقبلية، إضافة إلى تأثير موضع محطات الاستقبال جغرافياً. ركزت الدراسة بشكل أساسي على طرق و إجراءات تحديد الموقع التي تستخدم لتقدير موقع هدف ما عن طريق حل جملة معادلات غير خطية بالاعتماد على زمن وصول الإشارة في كل محطة من محطات الاستقبال. كما تم إجراء دراسة مكثفة حول المبدأ النظري والرياضي لعمل هذه الإجراءات، بالإضافة إلى المقارنة بينها من حيث التعقيد الحسابي والدقة التي تقدمها، والشروط المثلى لعمل كل منها. ومن خلال ذلك

يمكننا تحديد الإجراءات القابلة للتحقيق عتادياً. وبما أن إجراءات تحديد الموقع تتعلق بشكل أساسي بالفروقات الزمنية للوصول فكان لا بد من دراسة أثر دقة ساعة النظام على أداءه.

4.1. حول الأطروحة:

تنقسم هذه الأطروحة إلى مقدمة وثلاثة فصول رئيسية إضافة إلى الخاتمة. تناولت المقدمة لمحة عامة عن أهمية الدراسة، حيث تم تسليط الضوء على أنظمة السطح الجوي وأنواعها، بالإضافة إلى نظرة تاريخية لهذه الأنظمة ومستقبلها وأسباب تطورها. يستعرض هذا الفصل أيضاً أهمية نظام السطح MLAT بالمقارنة مع أنظمة السطح الأخرى من حيث التكلفة والدقة التي يمكن أن يحققها.

ينطلق الفصل الثاني بالحديث بشكل موسع عن أنظمة السطح متعددة المستقبلات، حيث يبدأ بسرد لأنواع أنظمة السطح المستخدمة تاريخياً، ويستعرض نقاط ضعف وقوة كل منها بالإضافة إلى مبدأ عملها. ويستفيض بعدها في ذكر تطبيقات أنظمة MLAT ومبدأ عملها، بالإضافة إلى العوامل الرئيسية المؤثرة على أدائها. حيث يركز على دراسة تقدير الموقع عبر الفروقات الزمنية للوصول، سواء كان الهدف موجوداً في مستوي النظام أو كان في مستوي مختلف عنه. ويبيّن أيضاً بلمحة سريعة أخطاء القياس التي من الممكن أن تؤثر على النظام، بالإضافة إلى تبيان الأثر الكبير لتغيير مواقع مستقبلات نظام MLAT على دقة الموقع الناتجة. كما يستعرض أخيراً الإشارات التي يمكن لأنظمة MLAT التعامل معها.

أما في الفصل الثالث فتركز الدراسة بشكل أساسي على طرق تقدير الموقع، حيث يستعرض هذا الفصل بدايةً المبادئ الأساسية لتقدير موقع هدف اعتماداً على قياسات الفروقات الزمنية للوصول ويلقي نظرة على أنواع المقدرات المستخدمة في حل المعادلات الناتجة. يحتوي هذا الفصل أيضاً على تصنيف لإجراءات تقدير الموقع يعتمد على نموذج المعطيات الذي يربط الجاهيل مع المعاليم رياضياً في مسألة تحديد الموقع، حيث تنقسم الإجراءات إلى ثلاث نماذج رئيسية وتندرج تحت كل منها العديد من الإجراءات المختلفة. وقد تم استعراض أشهر الإجراءات المستخدمة في كل نموذج ودراسة خواصها والمعادلات الرياضية التي تحكمها. كما جرى تسليط الضوء في هذا الفصل على قياسات الدقة لإجراءات تحديد الموقع والتركيز من بينها على الخطأ التريعي النظري بالاعتماد على الحدود الدنيا للتشتت. والتي بناءً عليها يقوم الفصل الرابع والأخير بإجراء المقارنة بين إجراءات تحديد الموقع المختلفة.

يستعرض الفصل الرابع إمكانية تصميم نظام MLAT سلبى بثلاثة مستقبلات فقط، والتحديات التي تواجه هذا التصميم. ودراسة أهم هذه التحديات وهو الالتباس بين إشارات النمطين A و C. وتم استنباط طريقتين مختلفتين من أجل

التخلص من هذا الالتباس، مع تبيان إمكانية استخدام هاتين الطريقتين وجدوى كل منهما. وقد تم طرح هاتين الطريقتين في مقال بعنوان A /C Modes Ambiguity Canceling for Passive Multilateration System with Three Receivers أرسل إلى مجلة Navigation والتي تعنى بمواضيع السطع والملاحة الجوية.

جرى خلال الدراسة استخدام برنامج المحاكاة MATLAB لإجراء محاكاة لنظام متعدد المستقبلات MLAT ودراسة أثر دقة ساعة النظام على إجراءات تقدير الموقع وتحديد الخطأ الأصغري في تقدير الموقع والذي لا يمكن تجاوزه من أجل دقة ساعة نظام معينة. وقد أظهرت النتائج أن لدقة ساعة النظام أثراً كبيراً على الخطأ الأصغري في تقدير الموقع، فكلما ازدادت دقة ساعة النظام كلما زادت دقة الموقع الناتجة.

تم في الخاتمة استعراض النتائج ومناقشتها والأعمال المستقبلية التي يمكن القيام بها من أجل الوصول إلى تصميم نظام MLAT سلمي متكامل قادر على تحديد موقع هدف بأفضل دقة ممكنة، وذلك يتطلب العديد من الدراسات المستقبلية عن الأخطاء في تقدير الموقع والتي من الممكن أن تؤثر على النظام، بالإضافة إلى الهندسة الجغرافية للنظام ونوعي بذلك أماكن توضع محطات الاستقبال بالنسبة لمنطقة السطع المطلوبة.

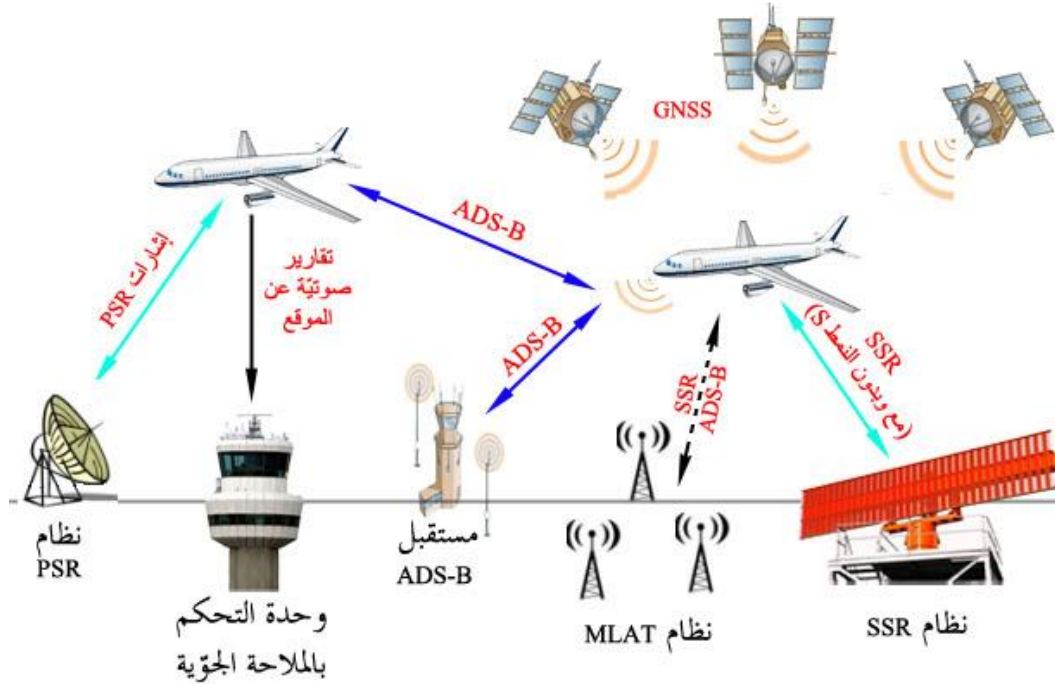
الفصل الثاني

أنظمة السّطع متعدّدة المستقبلات

Multilateration Systems

1.2. تقنيات السطع المستخدمة في أنظمة التحكم بالملاحة الجوية

إن للسّطع دوراً هاماً وأساسياً في تنظيم حركة المرور الجوي المدني والعسكري، وغالباً ما يستخدم السطع السلبي للأغراض العسكريّة، وذلك أن الهدف الأهم بالنسبة للطيران العسكري هو عدم الرغبة بكشف الطائرة وبالتالي فإن عملية السطع تتم بشكل مستقل عن معدّات الطائرة الإلكترونيّة. أمّا في حالة الطيران المدني فيُربغ بالحصول على أكبر قدر من المعلومات من الطائرة لاستثمارها بشكل مناسب في عمليّة السطع. يبيّن الشكل 1-2 طرق السطع المختلفة والمستخدمة عالمياً.



الشكل 1-2: أنظمة السطع العالميّة.

1.1.2. رادار السطح الأولي PSR

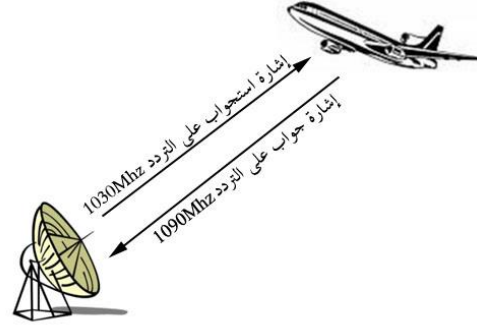
وهو أول نظام سطح مستخدم في أنظمة التحكم بالملاحة الجوية (ATC) والأكثر محدودية، ذلك أنه يكتشف وجود أجسام طائرة ولا يمكنه التمييز بينها [01]. يعتمد مبدأ عمل الرادار الأول على إرسال أمواج كهترطيسية باستطاعة عالية في الفضاء عبر هوائي مناسب، فإذا اصطدمت هذه الأمواج بجسم طائرة فإن جزءاً صغيراً من هذه الأمواج سينعكس باتجاه الرادار (الشكل 2-2)، لتعالج بعد ذلك الإشارة المنعكسة لتحديد موقع الهدف (المدى وزاوية السميت)، ومن أهم مساوئ استخدام هذا النظام، الاستطاعة العالية والتكلفة المرتفعة، إشارات الصدى غير المرغوبة (Clutter)، وعدم القدرة على تبادل المعلومات، بالإضافة إلى عدم إمكانية الرادار من تحديد هوية الطائرة.



الشكل 2-2: مبدأ عمل نظام PSR.

2.1.2. رادار السطح الثانوي SSR

جرى تطوير نظام SSR للتغلب على مساوئ نظام PSR من حيث التكلفة والوثوقية والأداء والسماح بمراقبة الطائرات، حيث أصبح بإمكان الطائرة إرسال معلومات عن هويتها وارتفاعها باستخدام SSR. وبالتالي فإن الرادارات الثانوية قادرة على تمييز كل طائرة على حدى، بحيث تُرسل هذه الرادارات إشارات استعمال في الجو على التردد 1030 MHz. يلتقط الجيب الموجود في الطائرات هذه الإشارات ويُرسل أجوبة مناسبة على استعلاماتها على التردد 1090 MHz (الشكل 2-3). هناك عدة أنماط للاستجابات في نظام SSR. تعطي هذه الأنماط هوية الطائرة (النمط A)، ومعلومات عن الارتفاع (النمط C). يمكن لنظام SSR تحديد موقع الطائرة بثلاث أبعاد (3D)، حيث أن المسافة بين الرادار والطائرة يمكن حسابه بمعرفة الفرق الزمني بين الاستجابات ورسالة الجواب.



الشكل 2-3: مبدأ عمل نظام رادار السطح الثانوي SSR.

3.1.2. رادار SSR بالنمط (S) Select

جرى تطوير النمط S للتغلب على بعض الظواهر التي يعاني منها نظام SSR التقليدي (كنداخلة إشارات جواب الأهداف المختلفة). يستخدم النمط S نفس ترددات الاستجواب والجواب المستخدمة في نظام SSR. ولكن لدى كل طائرة تملك مجيب للنمط S عنوان خاص بها عالمياً. يدعى عنوان (ICAO) International Civil Aviation Organization ويتكوّن من 24 خانة [04]. لذلك فإن نظام SSR بالنمط S قادر على استجواب طائرة محدّدة بغض النظر عن وجود طائرات قريبة منها.

4.1.2. نظام بث السطح الآلي المستقل ADS-B

على عكس أنظمة السطح السابقة، والتي تعتمد في عملها على إشارات جوية مرسلّة من الطائرة، فإن الطائرة أصبحت قادرة على تحديد موقعها والملاحة بشكل مستقل عن المحطّات الأرضية بفضل نظام ADS-B. وتقوم الطائرة بإرسال موقعها ومسار رحلتها إلى وحدة التحكم الأرضية ATC أو إلى طائرات أخرى. تقوم بتحديد موقعها بمساعدة نظام السواتل العالمي للملاحة (GNSS) Global Navigation Satellite System، وبثّه آلياً بمعدّل مرة في الثانية (الشكل 4-2). تجري عملية البث باستخدام مجيب النمط S تحت الوصلة الهابطة Extended Squitter. وتحتوي المعلومات على هويّة الطائرة، موقعها، ارتفاعها، سرعتها، مسار رحلتها، ومعلومات إضافية أخرى. ويجدر بالذكر هنا أن الحسّنات التي يقدمها ADS-B لا تصبح فعّالة بشكل كامل إلا عندما يتم تزويد جميع الطائرات بهذه التقنية، حيث أن الحصول على مسافات فصل أصغر بين الطائرات جواً بحاجة إلى معلومات أدق عن مواقعها. كما أنه في حال وجود طائرة في مكان لا تعمل فيه رادارات السطح فإن إشارة ADS-B هي الوحيدة التي يستقبلها نظام ATC.



الشكل 2-4: مبدأ نظام بث السطح الآلي المستقل ADS-B.

2.2. نظام متعدد المستقبلات MLAT

يعتبر نظام MLAT من أنظمة السطح المعتمدة منذ عدة عقود، حيث جرى تطويره لأغراض عسكرية بُغية عمليات السطح السليبي. يتكون النظام بشكل رئيسي من مجموعة من محطات الاستقبال (غالباً ما تكون مترامنة فيما بينها). ويحتوي على محطة استجواب واحدة أو أكثر في منطقة التغطية بالإضافة إلى وحدة معالجة مركزية (الشكل 2-5)، حيث يجري حساب موقع الهدف من خلال العديد من إجراءات تحديد الموقع.

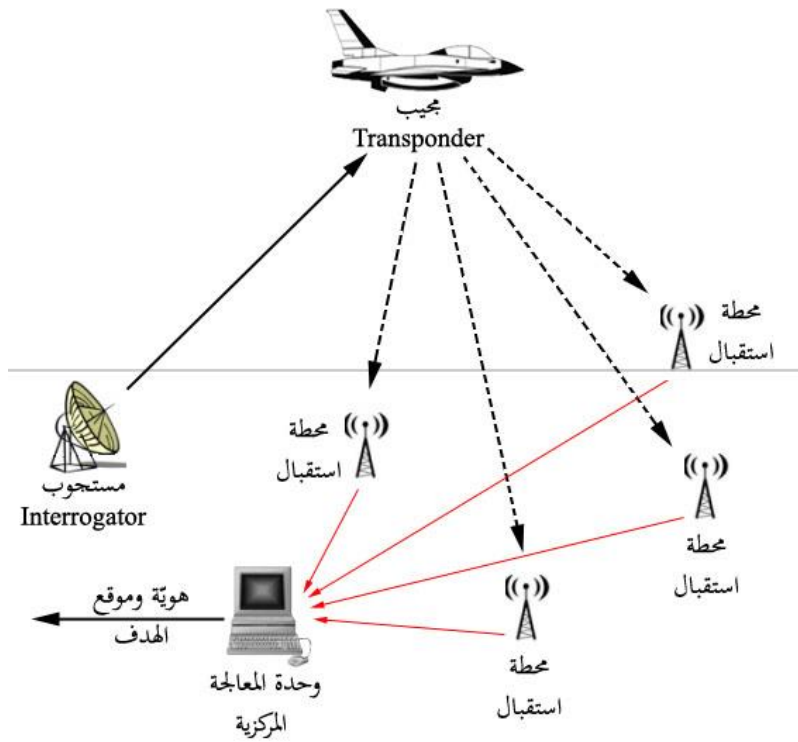
تعتمد أنظمة MLAT على استقبال إشارات الجواب المرسل من الهدف والتعامل معها في كل محطة من المحطات المشكّلة للمنظومة، ويجري توليد الإشارات بطريقتين، إما أن ترسل من قبل الجيب نفسه بشكل عفوي ومستمر (ADS-B)، أو أن يُقدح بجيب الهدف عن طريق استجواب خارجي، قد تكون محطة الاستجواب جزء من النظام أو جزء خارج عنه.

يجري حساب زمن الوصول للإشارة المستقبلية في كل محطة استقبال، بحيث تستخدم هذه الأزمنة لإيجاد موقع الهدف عبر طريقة حساب الفروقات الزمنية للوصول (Time Difference Of Arrival (TDOA). كما يمكن لمحطات الاستقبال أن تقوم بحساب بعض الخصائص الفيزيائية للإشارة المستقبلية كتأخير زمن الرحلة (Round Trip Delay (RTD، وزاوية

الوصول (AOA) Angle Of Arrival، وتدعى أنظمة MLAT التي تقوم بهذه القياسات بأنظمة MLAT المطوّرة (المحسّنة).

تقوم أنظمة MLAT بالعديد من الوظائف الأساسية وهي:

- كشف هويّة الهدف.
- تقدير موقع الهدف.
- ملاحقة الهدف.



الشكل 2-5: نظام MLAT بأربع محطات استقبال.

كما يعتمد أداء هذه الأنظمة بشكل كبير على ثلاث عوامل رئيسية وهي:

- جودة تخطيط النظام.
- نوع القياسات ودقّتها.
- جودة الإجراءات المستخدمة في تحديد الموقع.

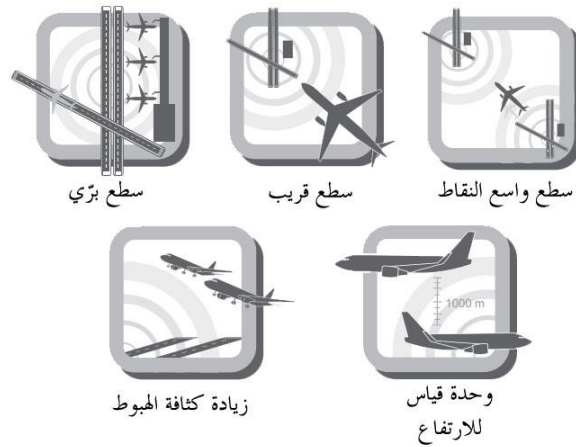
الهدف الرئيسي من جودة تخطيط النظام هو توظيف أقل عدد ممكن من المحطّات بغية الحصول على تغطية جيدة إضافةً إلى تحقيق المستوى المطلوب لأداء النظام. بشكل عام، فإن عملية اختيار عدد المحطّات ومواقعها من أجل التأقلم مع جميع العوامل ليس بالمهمة البسيطة، وعلى المصمّم إجراء العديد من المحاولات قبل الحصول على هندسة جغرافية مناسبة لها. تتأثر عملية تصميم النظام بالعديد من العوامل غير المتحكّم بها والتي من الممكن أن تقود إلى تصميم غير أمثلي، من هذه العوامل:

- أثر تعدّد المسارات.
- أخطاء الأجهزة.
- طريقة القياس المستخدمة (RTD, AOA, TOA/TDOA) وغيرها.

يمكن التمييز بين نوعين من أنظمة MLAT، **سليبي وفعال**. يتكوّن النظام السليبي من محطّات مهمتها الاستقبال فقط، بينما يوجد في النظام الفعّال محطة إرسال واحدة على الأقل من أجل استجواب الهدف، وتكمن ميزة النظام الفعّال بعدم الاعتماد على أي مصدر خارجي لقدح إشارة الجواب من الهدف.

1.2.2 تطبيقات MLAT

استطاع ATC باستخدام MLAT تقليص المسافة الدنيا للفصل بين الطائرات جواً والاستفادة أعظم ما يمكن من المجال الجوي المتاح من أجل زيادة الكثافة الجوية للطائرات مع الحفاظ على سلامتها. يحمّق أداء نظام MLAT متطلبات التغطية (coverage) للكثير من التطبيقات بشكل أفضل مما يحمّقه أداء نظام SSR التقليدي وبتكلفة أقل [03].



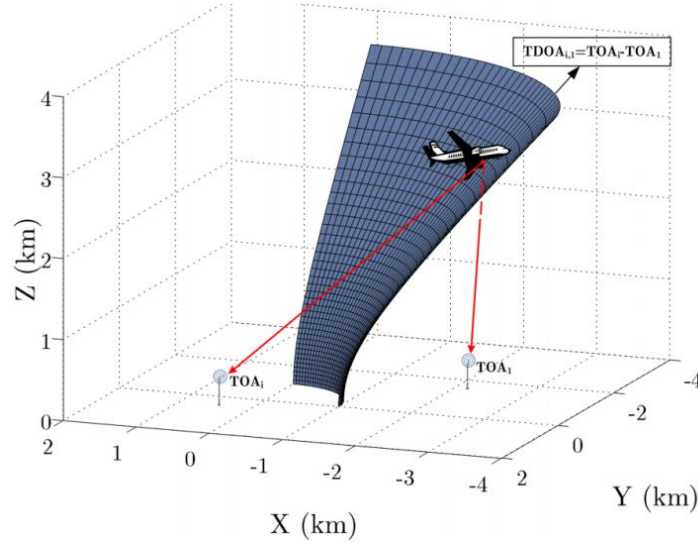
الشكل 2-6: أهم تطبيقات نظام MLAT.

يبين الشكل 2-6 أهم تطبيقات نظام MLAT وهي:

- السطع السلي لتحديد موقع وملاحقة الطائرات.
 - السطع السطحي لرصد حركة الأجسام برّاً في المطار.
 - السطع القريب (المنطقة المحيطة بالمطار) لتلافي مشاكل الاتصال المختلفة بسبب الطقس والتضاريس الجغرافية التي تحيط بالمطار (جبال، هضاب) وتمنع من أن تنخفض الطائرة تحت ارتفاع معيّن.
 - السطع واسع النطاق (مناطق الممرات الجوية) وفي هذا التطبيق من الممكن أن تصل المسافة الفاصلة بين محطات الاستقبال حتى 100 Km [03].
 - وحدة قياس للارتفاع بين الطائرات للحصول على كثافة جوية أعلى وإنشاء مسارات طيران جديدة.
 - زيادة كثافة هبوط الطائرات في المطارات التي تحتوي على مدرجات قريبة من بعضها ومتوازية.
- يجدر بالذكر هنا أنه يمكن لأي محطة في نظام MLAT أن تساهم في تطبيقات متعددة بالوقت نفسه

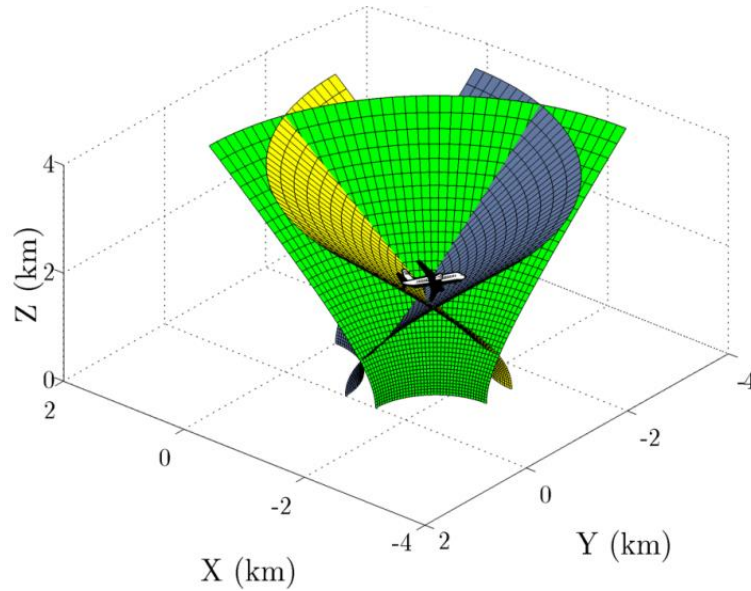
3.2. مبدأ عمل MLAT

تقوم كل محطة استقبال في نظام MLAT بتسجيل زمن وصول إشارة الهدف TOA، ومن ثم حساب TDOA للإشارة بين محطات الاستقبال المختلفة. تختلف قيم TDOA المقاسة باختلاف بعد الطائرة عن محطات الاستقبال. فمن أجل محطتي استقبال فقط، يمكن الحصول على قيمة TDOA واحدة فقط. تتعلق قيمة TDOA الناتجة بموقع محطتي الاستقبال وموقع الطائرة كما في (2-3). من أجل محطتي استقبال ثابتتين، يوجد مجموعة من النقاط في الفراغ يمكن للطائرة إذا ماتواجدت بها أن تعطي نفس قيمة TDOA (الشكل 2-7)، إن مجموعة النقاط هي عبارة عن سطح زائد (قطع زائد من أجل تحديد موقع ببعدين)

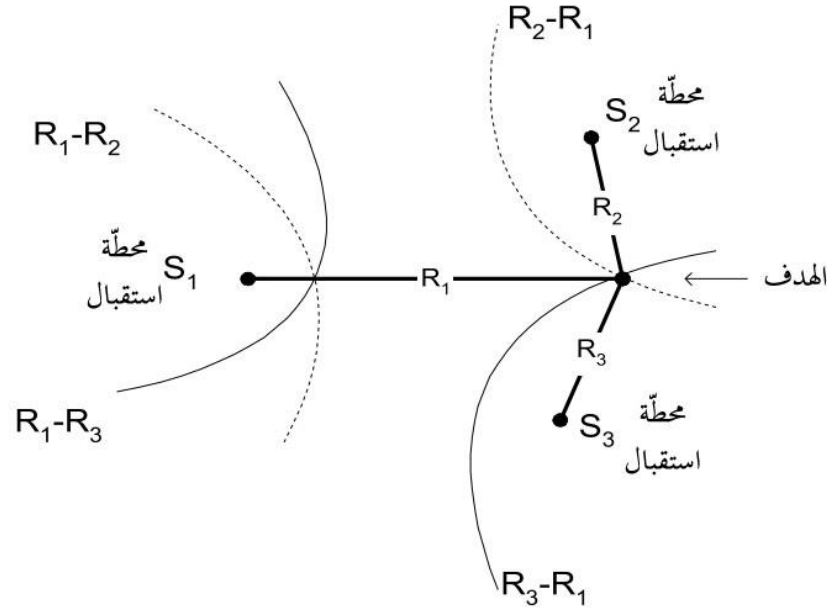


الشكل 7-2: المحل الهندسي لمجموعة مواقع الهدف والتي لها نفس TDOA لمخطتي استقبال.

بإضافة محطة استقبال أخرى (ثلاث محطات استقبال) يمكن الحصول على قياسي TDOA وبالتالي سطحين زائدين. ويصبح تقاطع السطحين الزائدين عبارة عن مستقيم. وفي حال وجود الطائرة في أي نقطة من نقاط هذا المستقيم فإنها ستعطي نفس قيم زوج TDOA المقاس. بوجود سطح زائد إضافي (إضافة محطة استقبال) فإن تقاطع السطوح الثلاث في الفراغ هو عبارة عن نقطة وحيدة هي موقع الطائرة (الشكل 8-2). يبين الشكل 9-2 تقاطع قطعين زائدين لتحديد موقع هدف موجود في نفس مستوي النظام.



الشكل 8-2: تحديد موقع هدف عبر تقاطع ثلاث قطوع زائدة (أربع محطات استقبال).



الشكل 2-9: تحديد موقع هدف ببعدين.

قد تتقاطع السطوح في مكانين مختلفين مما يؤدي إلى وجود أكثر من حل لحساب موقع الهدف. وفي هذه الحالة من الضروري إيجاد أي معلومات إضافية تسمح بإلغاء التقاطع الخاطئ، حيث يمكن الحصول على هذه المعلومات إما عبر إضافة محطات استقبال جديدة للنظام، أو استخدام أنواع أخرى من القياسات، أو من خلال استخدام معلومات أولية مجمعة من قبل النظام نفسه (مواقع محتملة من إجراءات ملاحقة للهدف)، أو عبر الاستفادة من معلومات قادمة من أنظمة خارجية أخرى عن الهدف.

في حال استخدام ثلاث محطات استقبال فقط يمكن تحديد موقع الهدف ببعدين ولا يمكن تحديد البعد الثالث للهدف إلا في حال تزويد معلومة الارتفاع من مصدر خارجي (مثال، النمط C في نظام الرادار الثانوي SSR). قد يحتوي MLAT في بعض الأحيان على أكثر من 4 محطات، وبالتالي فإن المعلومات الإضافية يمكن أن تستخدم لتأكيد صحة القياسات، أو لإيجاد وسطي القياسات، والذي سيؤدي بالنهاية إلى أخطاء أقل.

من المفترض أن تكون كل محطة قادرة على قياس زمن الوصول، ومع ذلك، توجد بُنى أنظمة MLAT حيث يجري قياس أزمته الوصول في وحدة المعالجة المركزية عوضاً عن المحطات المستقبلية. في هذا النوع من البنى يجب توصيف التأخير بين المحطات الأرضية ووحدة المعالجة المركزية بشكل دقيق، ومن ثم يضاف إلى قيم أزمته الوصول.

4.2. الفرق الزمني للوصول TDOA

كما ذكرنا سابقاً فإنّ نظام MLAT يعمل وفق مبدأ قياس الفروقات الزمنية للوصول، ويختلف عدد المستقبلات المطلوب في النظام حسب طبيعة القياس. من أجل تحديد موقع هدف ببعدين (2-D) فإن النظام بحاجة لثلاث مستقبلات على الأقل، بينما يحتاج لأربع مستقبلات على الأقل لتحديد موقع هدف بثلاثة أبعاد [06]. يمكن تحديد موقع هدف 3-D في نظام يحتوي ثلاث مستقبلات فقط وذلك يتم بالحصول على معلومة الارتفاع من الهدف نفسه (مثال، النمط C في SSR).

تُعطي علاقة زمن الوصول في كل محطة على الشكل:

$$\widehat{TOA}_i = t_e + \frac{r_i}{c} + n_i \quad (1-2)$$

حيث

- r_i المسافة بين الهدف والمحطة (مجهول).
- t_e زمن إرسال الجيب للإشارة.
- c سرعة الضوء.
- n_i خطأ قياس زمن الوصول.

ومن أجل تحديد موقع 3-D تصبح العلاقة السابقة كما في (2-2)، ومن أجل تحديد موقع 2-D تصبح (3-2):

$$\widehat{TOA}_i = t_e + \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + n_i \quad (2-2)$$

حيث

- (x, y, z) موقع الهدف.
- (x_i, y_i, z_i) موقع المحطة i .
- n_i خطأ قياس زمن الوصول.

$$\widehat{TOA}_i = t_e + \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + n_i \quad (3-2)$$

تعتمد طويولة n_i على العديد من العوامل، مثل:

- ✓ خطأ الأجهزة العادية.
- ✓ جودة الإشارة المستقبلية (نسبة الإشارة إلى الضجيج).

✓ ربح هوائي الإرسال والاستقبال.

✓ مخطّط التزامن بين المحطّات.

✓ أخطاء التكمية والتحويل من تماثلي إلى رقمي.

✓ أثر تعدّد المسارات.

بفرض أن أوّل محطة تستقبل الإشارة هي المحطّة المرجعيّة، فإن TDOA بينها وبين المحطّة i يعبر عنه بالعلاقة غير الخطية التالية:

$$\widehat{TDOA}_{i,1} = \widehat{TOA}_i - \widehat{TOA}_1 \quad (4-2)$$

$$\widehat{TDOA}_{i,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} + n_{i,1} \quad (5-2)$$

حيث يعبر $n_{i,1}$ عن خطأ القياس المكافئ من أجل TDOA.

يُلاحظ من المعادلة (5-2) أن المعامل المجهول (زمن إصدار الإشارة t_e) قد جرى حذفه، وبالتالي ليس هناك حاجة لمعرفته أو تقديره، وهذه إحدى محاسن استخدام تقنية TDOA. في المقابل، فإن (5-2) تمثّل سطح زائد، محارقه محطّي الاستقبال 1 و i . ومن الجدير بالذكر هنا أنّه من أجل M محطة استقبال يمكن الحصول على $M - 1$ تقديرات TDOA مستقلة عن بعضها [07]، في حين أن العدد الأعظمي لتقديرات TDOA يعطى بالعلاقة:

$$k = \frac{M!}{2(M-2)!} \quad (6-2)$$

5.2. مُعَامِل MLAT

تقوم أنظمة MLAT بجمع مجموعة من القياسات من عدة محطّات، ويجري الحصول على موقع الهدف بعد حل جملة من المعادلات غير الخطية. فإذا رمزنا لموقع الهدف بالشعاع $\theta = [x, y, z]$ ، ومجموعة القياسات بالشعاع $\hat{m}_{MLAT} = [\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_M]$ ، بحيث تمثّل \hat{m}_i أي نوع من القياسات الممكنة. فإن مسألة تحديد الموقع باستخدام MLAT يمكن أن يعبر عنها بالمعادلة

$$\hat{\theta} = \mathcal{M}\{\hat{m}_{MLAT}\} \quad (7-2)$$

حيث تشير θ إلى تقدير موقع الهدف. يُطلق على \mathcal{M} معامل MLAT، والذي يحوّل شعاع R^m إلى شعاع R^3 في الحالة العامة. يتّصف معامل MLAT بأنه معامل شديد اللاخطية، على الرغم من إمكانية التقريب الخطّي، وتعتمد دقة \mathcal{M} بشكل رئيسي على ثلاث عوامل، وهي:

- أخطاء القياس.
- هندسة النظام الجغرافية.
- إجرائية تحديد الموقع (الطريقة المستخدمة لحل جملة المعادلات الرياضية التي يُعرّفها \mathcal{M}).

1.5.2. أخطاء القياس

تتأثر القياسات التي تقوم بها المحطّات في نظام MLAT بالعديد من الظواهر والعوامل المسبّبة لنسبة معينة من الخطأ، والتي تسبّب في نفس الوقت عدم دقة في إجرائية تحديد الموقع. هناك العديد من المصادر للخطأ، منها ما ينشأ داخل النظام بحد ذاته، ومنها ما مصدره خارجي. الجدير بالذكر أن الظاهرة التي تسبّب الخطأ يمكن أن تؤثر على المحطّات المستقبلية بشكل متساوٍ أو غير متساوي. على هذا النحو، يمكن القول أن كل محطة تتأثر بعدة عوامل من مصدر الخطأ، والتي يمكن عرض أثرها في المعامل n_i للقياس المقابل والمستقل عن الزمن. بشكل عام، المعامل n_i عشوائي ولذلك يجب تحليله إحصائياً.

إن الأخطاء التي يتم توليدها خارج مكّونات النظام لا يمكن تعديلها داخله، ولكن يمكن استخدام تقنيات متقدمة تسمح بتعويض الأثر الناتج عن هذه الأخطاء على دقة النظام. من بين هذه الأخطاء تلك المتعلقة بانتشار الإشارة، كتعدّد المسارات وفقد الانتشار. يرتبط فقد الانتشار بشكل مباشر مع نسبة الإشارة للضجيج (SNR)، فكلما كانت المسافة الفاصلة بين الهدف والمحطة المستقبلية أكبر كانت SNR منخفضة أكثر. وكما هو واضح، فإن هذا النوع من الأخطاء يؤثر بشكل مختلف على المحطّات المستقبلية. أما تعدّد المسارات فهو يؤدي إلى أن المحطة تستقبل عدة نسخ من الإشارة المرسلّة من الجيب، ويمكن أن يكون سببها الانعكاس عن مباني، أو جبال، أو حتى أهداف أخرى. في هذه الحالة أيضاً فإن أثر الخطأ مختلف بين المحطّات بالإضافة إلى أنه يمكن أن يسبب انخفاض حاد في دقة النظام. بما أن هذا الخطأ (تعدد المسارات) يعتمد بشكل كبير على البيئة المحيطة بالنظام فإنه من الممكن التخفيف من أثره ببساطة عبر تغيير موقع المحطّات. من الأخطاء ذات المصدر الخارجي أيضاً الفقد أو الضياعات في المرسل (الجيب)، وذلك أن جودة الإشارة المستقبلية تعتمد أيضاً على جودة الإشارة المرسلّة. بالتالي فإن أي خلل في الجيب، كإخفاض التكبير، أو ربح الهوائي، أو إرسال منخفض الاستطاعة سيسبب انخفاض في نسبة SNR في المحطة المستقبلية، وأيضاً سيسبب زيادة في فقد الانتشار. يؤثر هذا المعامل،

ومن أجل نفس الهدف، بشكل متساوٍ على جميع محطات الاستقبال. أمّا بالنسبة لمطال الأخطاء التي تظهر لأسباب داخل النظام فهو يعتمد بشكل مباشر على صناعة وجودة أجهزة النظام وعلى بنية النظام بشكل عام. من بين هذه الأخطاء، تلك التي تنشأ من سوء التصنيع، أو أخطاء الأجهزة، عمليات التحويل تماثلي/رقمي، أو أخطاء المزامنة، أو عدم الدقة في معلومات موقع المحطات، أو ضياعات خطوط النقل وتأخير الوصلات الميكروية.

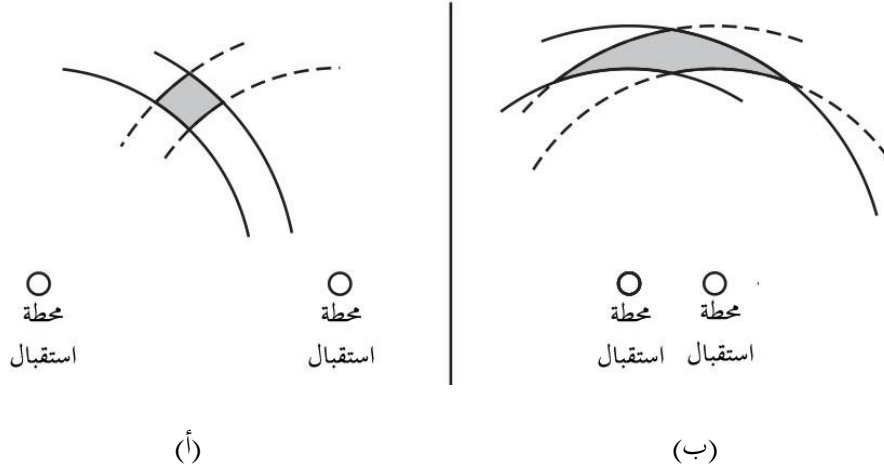
2.5.2. أثر الهندسة الجغرافية للنظام على أخطاء القياسات

يُطلق مصطلح الهندسة الجغرافية للنظام على الترتيب أو التوزع المكاني لمحطات الاستقبال في منطقة تغطية النظام. تعتمد الهندسة الجغرافية على نوع القياسات المستخدمة من قبل محطات الاستقبال، وذلك لأن كل قياس يمثّل فراغياً شكل هندسي معيّن، من أجل TDOA سطح زائد، بينما من أجل RTD فهي كرة [04]. سنركّز فيما يلي على التوصيف من أجل قياسات TOA/TDOA وذلك على الرغم من أن النظرية يمكن تعميمها من أجل باقي أنواع القياسات. يحوي كل قياس TDOA على خطأ موصّف بتوزع غوسي. بمتوسط معدوم وانحراف معياري σ_{TDOA} . ممّا يتسبب بانحراف في قياس المدى عن القيمة الحقيقية. يُعبّر عن جودة هندسة النظام الجغرافية بمعامل انخفاض الدقة (Dilution Of Precision (DOP). إن معامل انخفاض الدقة متحوّل مكاني (Space variant)، يُعبّر عن أثر الضجيج والارتياح في قياس المدى وفروقاته على دقة تقدير الموقع وذلك بالاعتماد على التوزع المكاني لمحطات الاستقبال بالنسبة للهدف. لذلك تختلف دقة النظام من أجل نفس هندسة النظام الجغرافية ونفس دقة القياسات عند نقاط مختلفة من منطقة التغطية. يبيّن الشكل 2-10 تمثيل جغرافي لمعامل انخفاض الدقة DOP في نظام ثنائي الأبعاد (2-D). حيث تمثل الأقواس في كلا الشكلين (أ) و (ب) انحراف قياسات المدى وهي نفسها في كلتا الحالتين، بينما تمثل المنطقة المظللة الارتياح أو عدم الدقة في إحداثيات الموقع. يُلاحظ أن منطقة الارتياح أكبر في الحالة (ب) وذلك بسبب التقارب بين محطتي الاستقبال جغرافياً. يمثّل Position DOP (PDOP) الشكل العام لمعامل انخفاض الدقة، وهو معامل بدون واحدة يُعبّر عن زيادة أخطاء القياس من أجل هدف بثلاثة أبعاد، ويُعطى بالعلاقة (8-2). تعتبر القيمة المثلى لمعامل انخفاض الدقة هي الواحدة، ويزداد تضخيم الضجيج بازدياد هذه القيمة عن الواحد.

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (8-2)$$

حيث σ_x ، σ_y ، و σ_z الانحراف المعياري في الاتجاهات x، y، و z على التوالي.

هناك شكلين آخرين لـ DOP مُشتقَّين من PDOP وهما Vertical DOP (VDOP) و Horizontal DOP (HDOP). تُمثّل HDOP جودة هندسة النظام الجغرافية في حساب موقع هدف في فضاء ثنائي البعد، مستوي (x,y)، في حين تمثّل VDOP الجودة من أجل المركبة العمودية (z) لشعاع موقع الهدف.



الشكل 2-10: تمثيل جغرافي لمعامل DOP من أجل (أ) محطّتي استقبال متباعدين فيما بينهما، (ب) محطّتي استقبال متقاربتين.

يجب تحليل وضبط دقة القياس و DOP في عملية تصميم نظام MALT وذلك للحصول على التشكيلة الملائمة للمحطّات والتي تؤمّن أفضل دقة نظرية ممكنة للنظام. ومن منطلق أن DOP هو قيمة محدّدة، فإنّه من الممكن القول أن موقع الهدف، كما يتم تحديده في MLAT، له نفس التصرف الإحصائي لضجيج القياس. على سبيل المثال، فإن موقع الهدف في نظام MLAT يمكن أن ينمذج على أنه يتبع توزيعاً غوسياً بمتوسط هو موقع الهدف الحقيقي وانحراف معياري مزوّد من قبل ضجيج القياسات و DOP.

3.5.2. إجراءات تحديد الموقع

أخيراً فإن العنصر الثالث في معامل MLAT (2-6) هو إجراءات تحديد الموقع، وهي المسؤولة عن إعطاء قيمة رقمية لموقع الهدف. في الحالة المثالية، فإن موقع الهدف كما تحدّده الإجراءات لديه عدم دقة (ارتباب) ناتج عن ضجيج القياسات و DOP. هناك العديد من إجراءات تحديد الموقع والتي سنأتي على ذكرها لاحقاً.

يمكن اعتبار مسألة تحديد موقع MLAT كمعامل رياضي تعتمد دقته على ثلاثة عناصر، الأول هو القياس، والثاني هو الهندسة الجغرافية للنظام، وهما الذان يحدّدان مستويات الدقة الأفضل للنظام (الحد الأدنى من الدقة). في حين أن المعامل

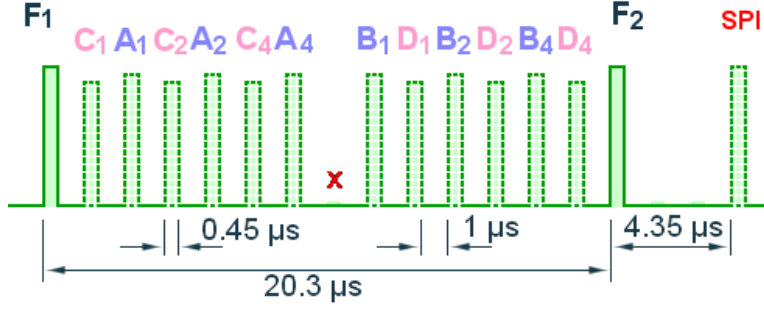
الثالث وهو إجرائية تحديد الموقع والمسؤولة عن تحديد قيمة موقع الهدف باستخدام القياسات والهندسة الجغرافية للنظام ، والتي من الممكن أن تصل دقتها النهائية إلى الدقة النظرية معتمدة على فعالية الإجرائية.

6.2. الإشارات المستخدمة في أنظمة MLAT

1.6.2. إشارات نظام SSR

هناك خمسة أنماط عمل مختلفة (1، 2، 3/A، C) في نظام SSR بعضها للاستخدام المدني والآخر للاستخدام المدني والعسكري معاً.

- النمط 1 (عسكري) : يُستخدم للاستعلام عن نوع الطائرة المحيية أو لمعرفة نوع المهمة المسندة للطائرة، وبالتالي يمكن أن تحمل أكثر من طائرة الرماز نفسه. يمكن أن تأخذ إشارة الجواب 32 رماز (Code) تعريف مختلف فقط.
 - النمط 2 (عسكري) : يُستخدم للاستعلام عن رقم الطائرة الخاص المكتوب على جسم الطائرة. تحتوي إشارة الجواب في النمط 2 على 4096 رقم مختلف.
 - النمط A/3 (عسكري/مدني) : وهو أكثر الأنماط استخداماً. ويُستخدم هذا النمط مع النمط C عالمياً للتحكم بطيران الطائرات الخاضعة لصك قواعد الطيران، ويجري في هذا النمط الاستعلام عن هوية الطائرة (ID)، وفيه يمكن تعريف 4096 رقم هوية مختلف للطائرات.
 - النمط C (عسكري/مدني) : يُستخدم للاستعلام عن ارتفاع الطائرة بدءاً من 1200- قدم وحتى 126700 قدم بدقة 100 قدم (ما يعادل 30 متر تقريباً).
- يبيّن الشكل 2-11 بنية إشارة جواب نظام SSR والمكوّنة من قطار من النبضات (12 نبضة) محتواة ضمن نبضتي بداية ونهاية إطار F1 و F2 ونبضة SPI تستخدم لمهام خاصة.

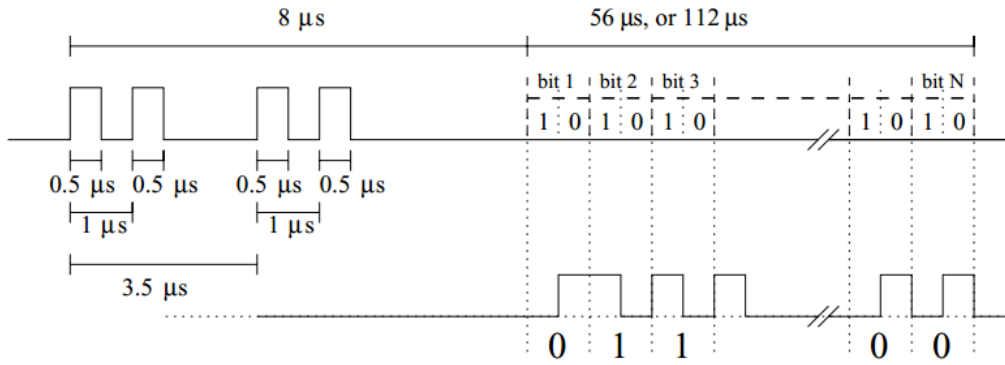


الشكل 2-11: بنية إشارة جواب نظام SSR.

مما سبق، نجد أنه من الممكن لإشارات SSR أن تستخدم في أنظمة MLAT، ذلك أنه من الممكن معرفة هوية الطائرة من خلال نمط الإرسال A. كما أنها قادرة على تزويد ارتفاع الطائرة للمحطات الأرضية. من الجدير بالذكر هنا أنه من الممكن أن يخلط المستقبل في نظام MLAT بين إشارة النمط A وإشارة النمط C وهذا قد يسبب مشكلة. سنأتي على ذكرها لاحقاً.

2.6.2. إشارات SSR النمط S

تتكوّن إشارة الجواب في النمط S من قطار من النبضات المعدّلة (56 أو 112 نبضة). يبيّن الشكل 2-12 بنية إشارة الجواب والمكوّنة من 4 نبضات مزمنة، يلي هذه النبضات قطار من النبضات المعدّلة بتعديل موقع النبضة (Pulse position modulation). تشكّل آخر 24 نبضة عنوان ICAO مضافاً إليها خانات فحص الزوجية.



الشكل 2-12: بنية إشارة جواب النمط S.

هناك 25 صيغة إجابة في النمط S موضّحة في الشكل 2-13. وكما ذكرنا سابقاً فإن آخر 24 بت من جواب رسالة في النمط S هي عبارة عن عنوان الطائرة مضافاً إليها بتات فحص الزوجية للرسالة. الحقل AA في الصيغ 11 و 17 و 18

هو عنوان ICAO للطائرة. يبين الجدول 1-2 المعلومات الخاصة والمحتواة بكل صيغة من صيغ الجواب (المعلومات الخاصة بكل حقل من حقول الصيغ مبينة بشكل تفصيلي في [08]).

Format No.	DF									
0	00000	VS:1	CC:1	1	SL:3	2	RI:4	2	AC:13	AP:24
4	00100	FS:3	DR:5	UM:6	AC:13	AP:24				
5	00101	FS:3	DR:5	UM:6	ID:13	AP:24				
11	01011	CA:3	AA:24	PI:24						
16	10000	VS:1	2	SL:3	2	RI:4	2	AC:13	MV:56	AP:24
17	10001	CA:3	AA:24	ME:56	PI:24					
18	10010	CF:3	AA:24	ME:56	PI:24					
19	10011	AF:3	104							
20	10100	FS:3	DR:5	UM:6	AC:13	MB:56	AP:24	DP:24		
21	10101	FS:3	DR:5	UM:6	ID:13	MB:56	AP:24	DP:24		
24	11	1	KE:1	ND:4	MD:80	AP:24				

الشكل 2-13: الصيغ المختلفة لإشارة جواب النمط S.

يرسل مجيب النمط S الصيغة رقم 11 بمعدّل مرّة كل واحد ثانية، تدعى هذه الإشارة Acquisition Squitter على عنوان ICAO للطائرة. إن إشارة 1090 extended squitter (إشارة ADS-B) مطابقة لإشارة Acquisition squitter ولكن مع معلومات إضافية، موقع GPS (ارتفاع، خط عرض، خط طول)، سرعة،... معدّل إرسال هذه الإشارة هو 6 Hz، تعتبر هذه الإشارة نتيجةً لمعدّل إرسالها المرتفع مناسبة جداً للاستخدام في أنظمة MLAT السلبية كما أنها لا تحتاج لإشارة استجواب تقدرح الجيب.

يمكن الاستفادة من جميع صيغ الجواب للنمط S وذلك على الرغم من أن بعض الصيغ لا تحتوي على عنوان ICAO بشكل صريح، حيث يكون العنوان مرمرّاً مع بتات فحص الزوجية، ويمكن استنتاج العنوان بفحص زوجية الرسالة كما هو موضّح في [11] ومن ثم إجراء عملية XOR مع الحقل AP من الجواب.

يجدر الذكر هنا أن دقة قياس الارتفاع في النمط S هي 25 قدم (100 قدم في أنظمة SSR التقليدية) مما يعطي دقة أكبر في عملية تحديد الموقع.

جدول 2-1: استخدامات إشارات جواب النمط S.

DF0	سطع جو-جو قصير (Airborne Collision Avoidance System (ACAS)
DF4	سطع، معلومات ارتفاع
DF5	سطع، معلومات هوية
DF11	جواب لاستعلام All-Call
DF16	سطع جو-جو طويل (ACAS)
DF17	جواب (ADS-B (1090 extended squitter)
DF18	جواب (1090 extended squitter/Non Transponder)
DF19	جواب (military extended squitter)
DF20	جواب وصلة اتصال B، معلومات ارتفاع
DF21	جواب وصلة اتصال B، معلومات هوية
DF22	خاص للاستخدامات العسكرية
DF24	جواب وصلة اتصال D (Extended Length Message (ELM)

الفصل الثالث

طرق تقدير الموقع في أنظمة MLAT السلبية

ESTIMATION METHODS FOR PASIVE MLAT POSITION LOCATION SYSTEMS

1.3. تمهيد

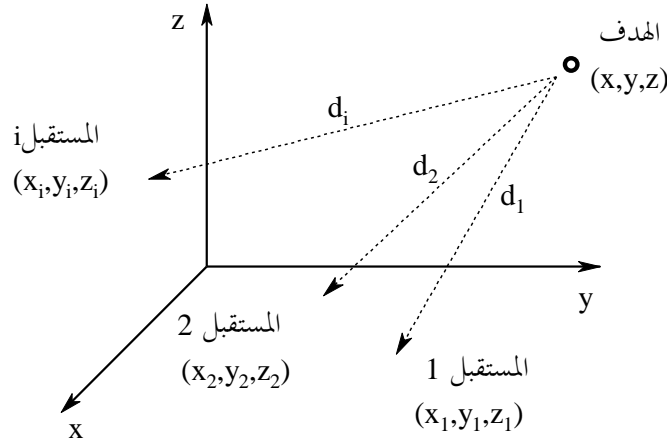
يمكن تلخيص مسألة تقدير الموقع في أنظمة MLAT السلبية على أنها إيجاد موقع هدف ما، ساكناً كان أو متحركاً، بالاعتماد على مجموعة من المستقبلات ذات الإحداثيات المعلومة. تعتمد الطرق التقليدية لحل هذه المسألة على إجراء مجموعة من القياسات على الإشارة المستقبلة في المحطات المختلفة، غالباً TDOA، سنستعرض في هذا الفصل المبادئ الأساسية لتقدير موقع هدف اعتماداً على قياسات TDOA، مع إمكانية التعميم على القياسات المختلفة الأخرى TOA، DOA، ... نستعرض أيضاً أشهر إجراءات تقدير الموقع المستخدمة في أنظمة MLAT، من حيث التعقيد الحسابي، عدد المستقبلات المطلوب، أداء الإجراءات مقارنةً بالإجراءات المختلفة الأخرى.

2.3. المبادئ الأساسية لتقدير موقع هدف اعتماداً على قياسات TDOA

نستعرض فيما يلي نموذجاً عاماً لتقدير موقع هدف ما اعتماداً على عدد معين من محطات الاستقبال M . بافتراض أن أول محطة تستقبل إشارة الهدف هي المحطة المرجعية ذات الإحداثيات المعلومة (x_1, y_1, z_1) ، كما أن موقع المحطة i معلوم أيضاً (x_i, y_i, z_i) ، حيث $i = 1, 2, \dots, M$ ، والشعاع $X = (x, y, z)$ يمثل إحداثيات الهدف المراد تقدير موقعه، بناءً على ماسبق فإنه يمكن كتابة المسافة الإقليدية d_i بين الهدف والمستقبل i بالعلاقة (1-3).

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1-3)$$

يبين الشكل 1-3 مخططاً عاماً لنظام متعدد المستقبلات MLAT مستخدم لتقدير موقع هدف ما.



الشكل 3-1: المخطط العام لنظام متعدد المستقبلات MLAT.

باعتبار r_i هو قياس زمن الوصول TOA لإشارة الهدف عند المحطة i ، والذي يرتبط بشكل مباشر بموقع الهدف X . بغياب أخطاء القياس فإن مجموعة القياسات r_i تساوي تابع معلوم $h_i(X)$ (2-3)، وفي حال وجود أخطاء في القياس (ضجيج جمعي η_i)، فإن مجموعة القياسات عند كل محطة استقبال تصبح كما في (3-3).

$$r_i = h_i(X) \quad (2-3)$$

$$r_i = h_i(X) + \eta_i \quad (3-3)$$

لا يعطي الحل المشترك لجملة المعادلات (3-3) قيمة محددة بسبب وجود الضجيج، وبالتالي يجب تقدير موقع الهدف عن طريق تصغير الخطأ التربيعي بين القياسات والنتائج المتوقعة للقياسات (القيمة الحقيقية).

يعتبر نموذج المعادلات (3-3) صالحاً من أجل أي نوع من القياسات على الإشارة المستقبلية [1]، وتؤول في حالة قياسات الفروقات الزمنية للوصول TDOA إلى:

$$r_{TDOA,i} = h_i(X) + \eta_{TDOA,i} \quad (4-3)$$

حيث $\eta_{TDOA,i}$ خطأ الفروقات في قياسات المدى $r_{TDOA,i}$ ، وهو ناتج عن أخطاء قياس الفروقات الزمنية $t_{TDOA,i}$ في حين أن

$$h_i(X) = d_{i,1} = d_i - d_1 \quad (5-3)$$

يمكن كتابة (4-3) بشكل مصفوفاتي:

$$\mathbf{r}_{\text{TDOA}} = \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X) + \boldsymbol{\eta}_{\text{TDOA}} \quad (6-3)$$

حيث

$$\mathbf{r}_{\text{TDOA}} = [r_{2,1}, r_{3,1}, \dots, r_{n,1}]^T$$

$$\boldsymbol{\eta}_{\text{TDOA}} = [\eta_{2,1}, \eta_{3,1}, \dots, \eta_{n,1}]^T$$

$$\mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

وبذلك تؤول مسألة تحديد الموقع في هذه الحالة إلى تقدير الشعاع X من أجل قياسات \mathbf{r}_{TDOA} معطاة. العلاقات السابقة (6-3) و (7-3) صالحة أيضاً من أجل تحديد موقع في الفراغ.

تعرف مصفوفة تغاير الضجيج بالعلاقة التالية:

$$N = E\{[\boldsymbol{\eta} - E[\boldsymbol{\eta}]][\boldsymbol{\eta} - E[\boldsymbol{\eta}]]^T\} \quad (8-3)$$

وبفرض أن الضجيج $\boldsymbol{\eta}$ يتبع توزع غوصي. بمتوسط معدوم، فإن تابع الكثافة الاحتمال لـ \mathbf{r}_{TDOA} يكتب بالشكل [1]:

$$P(\mathbf{r}_{\text{TDOA}}) = \frac{1}{(2\pi)^{N-1/2}|N|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)]^T N^{-1}[\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)]\right\} \quad (9-3)$$

حيث $|N|$ هو محدد N .

إنّ مقدر Maximum Likelihood (ML) هو ذلك الذي يعطي قيمة X والتي تعطي القيمة العظمى للعلاقة السابقة. وهذا يكافئ أن يعطي مقدر ML القيمة الصغرى للتابع $Q(X)$ المعروف كمايلي:

$$Q(X) = [\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)]^T N^{-1}[\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)] \quad (10-3)$$

تعتبر عملية تصغير $Q(X)$ معياراً مقبولاً لتحديد المقدّر حتى وإن كان الضجيج غير غوصي. في هذه الحالة يدعى المقدّر الناتج بمقدّر Least Square (LS) والمصفوفة N^{-1} هي مصفوفة معاملات التوزين.

3.3. تقدير LS:

هو عبارة عن إجرائية لتقدير موقع هدف عبر تصغير الخطأ التربيعي للقياسات والمعطى كما في (11-3). من أجل تنفيذ هذه الإجرائية، فإنه من الضروري نمذجة العلاقة بين الموقع والقياسات الفعلية.

$$\mathbf{e}_{\text{TDOA}} = \mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X) \quad (11-3)$$

يقوم مقدر LS بإيجاد الحل الأمثل لمجموعة المعادلات المعرفة في (6-3) عبر تصغير الخطأ التربيعي للقياسات (11-3) كمايلي:

$$\mathfrak{J}(X) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{e}_{\text{TDOA}})^2 = [\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)]^T [\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)] \quad (12-3)$$

يدعى التابع $\mathfrak{J}(X)$ بتابع كلفة LS، حيث يمكن تقدير الموقع \hat{X} من خلال إيجاد المعامل الأصغري له.

$$\hat{X} = \arg \min_X \{\mathfrak{J}(X)\} \quad (13-3)$$

يمكن الحصول على حل المعادلة السابقة عن طريق حساب القيمة المحلية الصغرى لتابع الكلفة، ويتم ذلك من خلال حساب تدرج $\nabla \mathfrak{J}(X)$ بالنسبة إلى X (14-3).

$$\nabla \mathfrak{J}(X) = -2[\mathbf{r}_{\text{TDOA}} - \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X)]^T \nabla \mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X) = 0 \quad (14-3)$$

تعرف المعادلة (13-3) إطار العمل في مقدر LS، وبالتالي عندما يتم تحديد النموذج $h_i(X)$ فإنه من الممكن إعادة صياغة المعادلة السابقة لإيجاد حل أسهل، ويندرج ماسبق تحت إطار النموذج غير الخطي.

تُدعى الإجرائية السابقة في الحالة العامة بـ LS الموزنة (Weighted LS (WLS)). ويكون ذلك في حال أعطت المصادر المختلفة للمعطيات قياسات مضججة بمعاملات ضجيج ذات خصائص إحصائية مختلفة. وفي هذه الحالة يقوم مقدر WLS بعملية تصغير لتابع الكلفة والذي هو نفسه التابع $Q(X)$ المعروف بالعلاقة (10-3).

1.3.3. تقدير LS الخطي (LLS):

يعتبر المقدر LLS حالة خاصة من المقدر LS، ويمتاز هذا المقدر بأن النموذج $H(X)$ في (6-3) خطي، أي:

$$\mathbf{H}_{\text{TDOA}}(X) = H \cdot X \quad (15-3)$$

وهذه الميزة تبسط الشكل الرياضي للمقدّر فيكون لدينا

$$\nabla \mathfrak{S}(X) = -2[\mathbf{r}_{TDOA}^T - X^T H^T] \nabla H X = 0 \quad (16-3)$$

وبما أنّ تدرج $H(X)$ بالنسبة إلى X هو H يكون

$$\nabla \mathfrak{S}(X) = -2[\mathbf{r}_{TDOA}^T - X^T H^T] \nabla H = 0 \quad (17-3)$$

ومنه يمكن الحصول على حل Closed-Form

$$X = (H^T H)^{-1} H^T \mathbf{r}_{TDOA} \quad (18-3)$$

بشكل مماثل، فإن طريقة تعميم مقدر LLS يعطي حلاً مشابهاً

$$X = (H^T N^{-1} H)^{-1} H^T N^{-1} \mathbf{r}_{TDOA} \quad (19-3)$$

من الخصائص المهمة للتقدير باستخدام LLS هو مصفوفة التباين، والتي تعبر عن دقة القياسات في تحديد الموقع

$$P = E \{ [\hat{X} - E[\hat{X}]] [\hat{X} - E[\hat{X}]]^T \} \quad (20-3)$$

$$P = E \{ [\hat{X} - X] [\hat{X} - X]^T \} = (H^T N^{-1} H)^{-1}$$

في الجزء السابق كان النموذج في معادلة $\mathfrak{S}(X)$ خطّي، ولكن في الحالة العامّة من الطرق غير الخطيّة فإنّ الشكل الرياضي يصبح أكثر تعقيداً، ويكون الحل الأمثلي لحالات النماذج غير الخطيّة هو حل مسألة LS باستخدام طرق عددية للتقدير، وفي هذه الحالة تؤوّل المسألة إلى تقدير عددي لـ

$$\hat{X} = \arg \min_X \{ \mathfrak{S}(X) \} = \arg \min_X \left\{ \sum_{i=1}^n Y_i [r_i - h_i(X)]^2 \right\} \quad (21-3)$$

حيث أنّ Y_i مصفوفة التوزين، وتُعرّف بشكل عام على أنّها مقلوب التشتت للضجيج.

يجدر بالذكر أنه عند احتواء التابع $\mathfrak{S}(X)$ على نهاية محلية مختلفة وبعيدة عن النهاية العظمى المطلقة فإنّ إيجاد التقدير \hat{X} ليس بالمهمة السهلة. وبما أنّ إجراءات التقدير تعمل ضمن مجال محدد، فإنّه يجب ضمان أن يكون التابع داخل هذا المجال محدباً (Convex)، وإلا فإنّ إجراءات تحديد الموقع لاتضمن الحصول على القيمة الصغرى المطلقة. يبين الجدول 1-3 مجموعة من المقدّرات المختلفة المستخدمة في إجراءات تحديد الموقع مع تحديد محاسن ومساوئ كل منها.

الجدول 3-1: مقارنة بين مقدرات تحديد الموقع المختلفة.

المقبر	المحاسن	المساوي
NLS	<ul style="list-style-type: none"> • دقة عالية. • لا يحتاج لإحصائيات عن الضجيج. 	<ul style="list-style-type: none"> • التقارب من الحل الصحيح غير مضمون.
ML	<ul style="list-style-type: none"> • يعطي أعلى دقة ممكنة. 	<ul style="list-style-type: none"> • التقارب من الحل الصحيح غير مضمون. • إحصائيات الضجيج مطلوبة.
LLS	<ul style="list-style-type: none"> • التقارب من الحل الصحيح مضمون. • بسيطة وفعالة حسابياً. • لا يحتاج لإحصائيات عن الضجيج. 	<ul style="list-style-type: none"> • دقة منخفضة.
WLLS	<ul style="list-style-type: none"> • التقارب من الحل الصحيح مضمون. • أعلى دقة ممكنة بشروط. 	<ul style="list-style-type: none"> • إحصائيات الضجيج مطلوبة. • قد يحتوي الحل على إجراء تكراري.

4.3. إجراءات تحديد الموقع

يمكن تصنيف إجراءات تحديد الموقع إلى صنفين، الأول Open Form وهي الطرق التكرارية والتي تحتاج إلى تقدير أولي لموقع الهدف أو نقطة قريبة من الهدف، والثانية Closed Form وهي طرق مباشرة لا تحتاج إلى تقدير أولي أو تكرار لإيجاد الحل.

تتكون أي إجراءات تحديد موقع من نموذجين أساسيين [15]، النموذج الرياضي والنموذج الرقمي. يقوم النموذج الرياضي بربط المجاهيل مع المعاليم في المسألة رياضياً. أما النموذج الرقمي فهو يمثل الطريقة الرقمية لحل جملة المعادلات الناتجة عن معادلات نموذج المعطيات، لذلك فمن الواضح أنه من الممكن استخدام نماذج معطيات مختلفة مع نماذج رقمية مختلفة. وبناءً عليه فإن فعالية أي إجراءات تحديد موقع يمكن أن تجزأ إلى:

- فعالية إحصائية، وهي التي تتعلق بانزياح القياسات (Bias) وتوزع خطأ القياسات.
- فعالية عددية، وهي التي تتعلق بإمكانية إعطاء قيمة رقمية صحيحة لموقع الهدف.

من الواضح أنه من أجل الحصول على فعالية إحصائية مناسبة فإن الفعالية العددية يجب أن تكون مؤكدة (تقارب الحل). بشكل طبيعي عندما تكون قيمة DOP للنظام جيدة (محدودة)، فإن تحليل إجراءات تحديد الموقع المختلفة ليس حرجاً (Critical) حيث أن معظم هذه الإجراءات يصل إلى الحدود النظرية بنفس الأداء. في حين أنه من أجل قيم DOP

مرتفعة أو سريعة التغيير، فإن فعالية إجرائية تحديد الموقع تلعب دوراً كبيراً في دقة النظام، والتي من الضروري أن تحلّ وتوصّف بشكل دقيق جداً [15].

نهتم في هذه الدراسة بنماذج المعطيات، والتي بدورها تُقسم إلى ثلاثة أقسام [15] وهي نماذج المعطيات الإحصائية، نماذج المعطيات الجبرية، ونماذج المعطيات العددية.

5.3. نماذج المعطيات الإحصائية:

يفترض هذا النموذج بعض الفرضيات الإحصائية، وتعتمد معظم إجراءات هذا الصنف على مبدأ Maximum likelihood. يجري اللجوء في هذه النماذج إلى التقريب الخطّي والطرق التكرارية، ذلك أن معادلات هذه النماذج شديدة اللاخطية، وهناك حاجة إلى تقدير أوّلي للهدف وبالتالي التقارب غير مضمون دوماً.

تعطي هذه النماذج حلاً وحيداً لموقع الهدف وتتطلب $n + 1$ محطة استقبال من أجل تحديد موقعه بـ n بعد. يكمن الحل العام لإجرائيات تحديد الموقع في هذه النماذج على إيجاد القيمة الصغرى للتابع $Q(X)$ والمعروف في المعادلة (3-10). ويعتمد الحل في غالب الأحيان على التقريب بسلاسل تايلور للتابع $H_{TDOA}(X)$ ليكون:

$$H_{TDOA}(X) = H_{TDOA}(X_0) + J(X - X_0) \quad (22-3)$$

حيث $J(X - X_0)$ هي مصفوفة يعقوبيان (Jacobian) لمشتقات $H_{TDOA}(X)$. و X_0 هو التقدير الأوّلي لموقع الهدف. ويعتمد تقارب إجرائيات تحديد الموقع على جودة اختيار النقطة الابتدائية X_0 . ومن أشهر الإجرائيات التي تندرج ضمن النموذج الرياضي الإحصائي هي الإجرائية التي اقترحها Foy في [17] والموصّفة والمحلّلة إحصائياً في [18].

1.5.3. التقدير باستخدام سلاسل تايلور:

وتدعى أيضاً باستيفاء غاوس-نيوتن وهي إجرائية تكرارية لحل مجموعة من المعادلات غير الخطية لتحديد موقع هدف. يبدأ الحل بتوقع مبدأ للهدف ويتم تحسين التقدير عبر تحديد LLS محلي، ويتقارب التقدير من القيمة الحقيقية للهدف مع كل تكرار. من أهم خواص هذه الإجرائية أن الإجرائية تعطي حل وحيد دون التباس على عكس بعض الإجرائيات الأخرى. ويتم توسيط القياسات المتعددة والمستقلة لمحة استقبال واحدة بشكل طبيعي، كما أنه يمكن العثور على الانتشار الإحصائي (Statistical Spread) بسهولة وبشكل طبيعي.

إنَّ إجرائية التقدير باستخدام سلاسل تايلور مكلفة حسابياً، بالإضافة إلى أنَّ التقارب من الحل غير مضمون. يُعطى التابع h_i في العلاقة (5-3) على أنه [17]:

$$h_i(x, y, x_k, y_k) = r_i - \eta_i \quad (23-3)$$

وبالتالي تتوول مسألة تحديد الموقع إلى إيجاد الشعاع X من القياسات r_i ، h_i ، ومواقع المستقبلات.

إذا كان التوقع المبدئي لموقع الهدف $X_0 = [x_0, y_0]^T$ ، يكون موقع الهدف

$$x = x_0 + \Delta x \quad (24-3)$$

$$y = y_0 + \Delta y$$

بنشر التابع h_i بسلاسل تايلور مع أخذ الحد الأول والثاني من النشر يكون:

$$h_{i0} + a_{i1}\Delta x + a_{i2}\Delta y \cong r_i - \eta_i \quad (25-3)$$

$$.a_{i1} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial y} \right|_{x_0, y_0}, \quad a_{i2} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial x} \right|_{x_0, y_0}, \quad h_{i0} = h_i(x_0, y_0, x_k, y_k) \text{ حيث}$$

وبالتالي يمكن كتابة (25-3) بالشكل المصفوفاتي كالتالي:

$$A\delta \cong R - \eta \quad (26-3)$$

حيث

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 - h_{10} \\ r_2 - h_{20} \\ \vdots \\ r_n - h_{n0} \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_n \end{bmatrix}$$

واختيار δ الذي يعطي الخطأ LS في هذه العلاقة هو:

$$\delta = [A^T N^{-1} A] A^T N^{-1} R \quad (27-3)$$

حيث N مصفوفة تغاير الضجيج المعرفة في (8-3).

يجري إيجاد تقدير لموقع الهدف باتباع الخطوات التالية:

- حساب Δx و Δy من (27-3).
- نعوض $y_0 \leftarrow y_0 + \Delta y$ و $x_0 \leftarrow x_0 + \Delta x$ في (26-3).
- إعادة حساب Δx و Δy من جديد.
- يتقارب التكرار من موقع الهدف عندما تصبح Δx و Δy قريبة جداً من الصفر. وتكون مصفوفة تباين الأخطاء:

$$Q_0 = [A^T N^{-1} A]^{-1} \quad (28-3)$$

عندما تكون مصفوفة التباين $N = \sigma^2 I$ ، أي عندما تكون مركبات الضحيح η_i مستقلة ولها نفس التشتت σ^2 ، في هذه الحالة يكون:

$$\delta = [A^T A]^{-1} A^T R \quad (29-3)$$

حيث أن المصفوفة $[A^T A]^{-1}$ حساسة وتابعة للهندسة الجغرافية للنظام. من أجل جميع الحالات، فإن مصفوفة التباين Q_0 تعطي عند المرحلة الأخيرة إحصائيات تقدير موقع الهدف النهائي.

$$Q_0 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

6.3. نماذج المعطيات الجبرية:

تقوم هذه النماذج بالتلاعب جبرياً بمعادلات القطوع (السطوح) الزائدة لإيجاد معادلات خطية تربط المعالم مع الموقع المجهول. هذه النماذج بسيطة للغاية فهي تستخدم علاقات جبرية (رياضية) فقط، إلا أنها بحاجة لعدد مستقبلات أكبر وتعطي معامل ضحيح تربيعي وتكعيبي. وتتميز هذه النماذج بأنها لا تحتاج إلى تقدير أولي، والحلول الناتجة منحازة وغير أمثلية إحصائياً. كما يعتبر أداءها أفضل من أداء النماذج العددية، وبسبب نقص الفرضيات العددية فإن هذه النماذج تعطي دقة أكبر من أجل عدد مستقبلات أقل، وتحتاج هذه النماذج إلى $n + 1$ أو $n + 2$ محطة استقبال لتحديد موقع هدف بـ n بعد تماماً كالنماذج العددية، و بشكل عام يعطى الحل لهذه النماذج كالتالي:

$$Ax + By + Cz = D \quad (31-3)$$

حيث تعتمد المعاملات A, B, C, D على القياسات ومواقع محطات الاستقبال. إن اختلاف الإجراءات في هذه النماذج يعني اختلاف مجموعة المعاملات A, B, C, D . من أشهر الإجراءات التي تدرج تحت هذه النماذج إجرائية Geyer and

[19] Daskalakis. وهي تطبيق عملي لإجرائية Bancroft [20]، والتي اقترحت من أجل نظام GPS، والتي كانت تعتمد قياسات TOA عوضاً عن TDOA. وتستفيد إجرائية Bancroft من جداء لورنز الداخلي للأشعة والمعرف من أجل الشعاعين $\mathbf{U} = [u_1, u_2, u_3]^T$ و $\mathbf{V} = [v_1, v_2, v_3]^T$ كمايلي:

$$\langle \mathbf{V}, \mathbf{U} \rangle = v_1 u_1 + v_2 u_2 - v_3 u_3 \quad (32-3)$$

بالعودة إلى نظام MLAT فإن الهدف يمثّل بالشعاع \mathbf{S}_a والمحطة المستقبلة بالشعاع \mathbf{S}_i [19] كالتالي:

$$\mathbf{S}_a = \begin{bmatrix} x \\ y \\ c \cdot t_a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ c \cdot t_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (32-3)$$

حيث c سرعة انتشار الإشارة، t_i زمن وصول الإشارة إلى المستقبل i ، t_a زمن إرسال الإشارة من الهدف.

يمكن كتابة الأشعة السابقة من أجل قياسات TDOA كالتالي:

$$\mathbf{S}_a = \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ d_{1,i} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (33-3)$$

لدينا من العلاقة (5-3)

$$d_i^2 = (d_{i,1} + d_1)^2 \Rightarrow d_i^2 = d_{i,1}^2 + d_1^2 + 2d_{i,1}d_1 \quad (34-3)$$

بتعويض (1-3) في (34-3) من أجل هدف 2-D يكون:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_{i,1}^2 + d_1^2 + 2d_{i,1}d_1 \quad (35-3)$$

وبالتعديل في المعادلة السابقة:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + x_i^2 + y_i^2 - 2xx_i - 2yy_i &= d_{i,1}^2 + d_1^2 + 2d_{i,1}d_1 \\ \Rightarrow 2(xx_i + yy_i + d_{i,1}d_1) &= x^2 + y^2 + x_i^2 + y_i^2 - d_{i,1}^2 - d_1^2 \end{aligned} \quad (36-3)$$

وبما أنّ $d_{i,1} = -d_{1,i}$ يكون:

$$2(xx_i + yy_i - d_{1,i}d_1) = (x^2 + y^2 - d_1^2) + (x_i^2 + y_i^2 - d_{1,i}^2) \quad (37-3)$$

وبالاستفادة من (32-3) يمكن أن نكتب:

$$2\langle \mathbf{S}_a, \mathbf{S}_i \rangle = \langle \mathbf{S}_a, \mathbf{S}_a \rangle + \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{S}_i \rangle \quad (38-3)$$

وبالشكل المصفوفاتي:

$$2AS_a = \lambda.1 + b \quad (39-3)$$

حيث

$$A = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & -d_{1,2} \\ x_3 & y_3 & -d_{1,3} \end{bmatrix}, \quad \lambda = \langle S_a, S_a \rangle, \quad b = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - d_{1,2}^2 \\ x_3^2 + y_3^2 - d_{1,3}^2 \end{bmatrix}, \quad 1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (40-3)$$

بما أن المصفوفة A قابلة للقلب يمكن كتابة المعادلة (39-3) على النحو التالي:

$$S_a = \frac{1}{2}\lambda.A^{-1}.1 + \frac{1}{2}A^{-1}.b \quad (41-3)$$

أو

$$S_a = \lambda.g.1 + e \quad (42-3)$$

حيث

$$g = \frac{1}{2}A^{-1}.1 = [x_g \quad y_g \quad d_g]^T, \quad e = \frac{1}{2}A^{-1}.b = [x_e \quad y_e \quad d_e]^T \quad (43-3)$$

بأخذ تنظيم لورنز للعلاقة (42-3)

$$\lambda = \langle g, g \rangle \lambda^2 + 2\langle g, e \rangle \lambda + \langle e, e \rangle \quad (44-3)$$

أو

$$\alpha\lambda^2 + \beta\lambda + \gamma = 0 \quad (45-3)$$

حيث

$$\alpha = \langle g, g \rangle = x_g^2 + y_g^2 - d_g^2$$

$$\beta = 2\langle g, e \rangle - 1 = 2x_g x_e + 2y_g y_e - d_g d_e - 1 \quad (46-3)$$

$$\gamma = \langle e, e \rangle = x_e^2 + y_e^2 - d_e^2$$

من أجل $\alpha \neq 0$ هناك حلين للمعادلة (45-3).

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{2\alpha} \left(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} \right) \quad (47-3)$$

وبالتالي يوجد حلين لموقع الهدف

$$\hat{\mathbf{S}}_{a_{\pm}} = \lambda_{\pm} \mathbf{g} + \mathbf{e} \Rightarrow \hat{\mathbf{S}}_{a_{\pm}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{a_{\pm}} \\ \hat{y}_{a_{\pm}} \\ \hat{d}_{1_{\pm}} \end{bmatrix} \quad (48-3)$$

ويمكن تحديد الحل الصحيح بمعرفة مسبقة عن مكان الهدف النسبي بالنسبة للنظام [19]. ومن أجل $\alpha = 0$ فللمعادلة

حل وحيد

$$\lambda = \frac{-\gamma}{\beta} \Rightarrow \hat{\mathbf{S}}_a = \begin{bmatrix} \hat{x}_a \\ \hat{y}_a \\ \hat{d}_1 \end{bmatrix} \quad (49-3)$$

7.3. نماذج المعطيات العددية:

تقوم هذه النماذج بوضع تابع رياضي يربط الموقع غير المعروف مع قياسات بعض المعاملات المرتبطة بالهدف. وتكون النماذج الناتجة خطية. بمتحول وحيد. ومن أجل تبسيط الحل يجري افتراض بعض التقريبات العددية بين موقع الهدف والمعامل المشتق منه. والتي تكون مستقلة عن التوزعات الإحصائية لأخطاء القياس ولا تحتاج إلى تقدير أولي لموقع الهدف وبالتالي فهي Closed Form. وتكون الكلفة الحسابية المطلوبة لحل هذا النوع من النماذج أقل من المطلوب لحل النماذج الإحصائية ولكن بالمقابل فإن الحل بشكل عام يكون مزاحاً وغير أمثلي إحصائياً. تتطلب هذه النماذج $n + 1$ أو $n + 2$ محطة استقبال لتحديد موقع هدف بـ n بعد. وتعطي بعض الإجراءات إمكانية وجود حلين لموقع الهدف وذلك بسبب اعتمادها على نماذج معطيات تربيعية، كما تحتاج هذه الإجراءات إلى عمليات إضافية لتحديد أحد الحلين على أنه موقع الهدف.

يعطى شعاع تابع الخطأ الأمثلي لهذه الإجراءات بالشكل العام على النحو التالي:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\delta} - 2d_s \hat{\mathbf{m}} - 2\mathbf{S}\boldsymbol{\theta} \quad (50-3)$$

حيث $\boldsymbol{\delta}$ شعاع معلوم يعتمد على قياسات فروق المدى ومواقع محطات الاستقبال، d_s مدى الهدف بالنسبة لنقطة مرجعية (مبدأ الأحداثيات غالباً)، \mathbf{S} مصفوفة معلومة وتعتمد أيضاً على قياسات فروق المدى ومواقع محطات الاستقبال

(وهي المصفوفة التي تحتوي على معلومات عن الهندسة الجغرافية للنظام)، \hat{m} شعاع القياسات، و θ موقع الهدف غير المعلوم، وتعتبر إجرائية [21] Friedlander، وإجرائية [22] Chan and Ho من أشهر إجرائيات نماذج المعطيات العددية.

1.7.3. إجرائية Friedlander:

تستخدم هذه الإجرائية معياري LS و WLS لتقدير موقع الهدف. إن حل LS يعطي تقدير ML في حال كانت أخطاء فروقات المدى غير مرتبطة ولها توزع غوصي. بمتوسط معدوم وتشتت متساو. في حال كان التشتت متساو فإن WLS هي تقدير ML. في جميع الحالات التشتت غير معلوم أو من الصعب تقديره. من أجل أربعة محطات استقبال فإن الإجرائية تعطي حل LS و WLS متطابقين وبزيادة عدد المستقبالات فإن حل WLS يتفوق بأدائه على LS. تفترض هذه الإجرائية أن d_1 مستقلة عن x, y وبذلك يمكن تخفيض التعقيد الحسابي إلا أنها غير أمثلية بشكل تام (suboptimal) لأنها لا تعتمد على العلاقة الأساسية. تفترض الإجرائية شعاع تابع الخطأ الأمثلي معدوم ($\epsilon = 0$) وتؤول (50-3) إلى الشكل التالي:

$$S\theta = \delta - d_s \hat{m} \quad (51-3)$$

حيث

$$S = \begin{bmatrix} (x_1 - x_i) & (y_1 - y_i) & (z_1 - z_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_{i-1} - x_i) & (y_{i-1} - y_i) & (z_{i-1} - z_i) \\ (x_{i+1} - x_i) & (y_{i+1} - y_i) & (z_{i+1} - z_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_M - x_i) & (y_M - y_i) & (z_M - z_i) \end{bmatrix}, \delta = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} d_1^2 & -d_i^2 & -d_{1,i}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i-1}^2 & -d_i^2 & -d_{i-1,i}^2 \\ d_{i+1}^2 & -d_i^2 & -d_{i+1,i}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_M^2 & -d_i^2 & -d_{M,i}^2 \end{bmatrix}, \hat{m} = \begin{bmatrix} d_{1,i} \\ \vdots \\ d_{i-1,i} \\ d_{i+1,i} \\ \vdots \\ d_{M,i} \end{bmatrix} \quad (52-3)$$

يفترض Friedlander أن i هي المحطة المرجعية وقد تكون أي محطة من محطات النظام. تعتمد فكرة الحل في هذه الإجرائية على إزالة المقدار المضجج d_s بضرب أولي للعلاقة (51-3). بمصفوفة μ تحقق $\mu \cdot \hat{m} = 0$. تعطى علاقة المصفوفة μ كالنالي [21]:

$$\mu_i = (I - Z) \cdot D_i \quad (53-3)$$

حيث

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ & \ddots & \ddots \\ 0 & & 1 \\ 1 & & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_i = [\text{Diag}\{\hat{\mathbf{m}}\}]^{-1} = \begin{bmatrix} d_{1,i} & & & \\ & \ddots & & 0 \\ & & d_{i-1,i} & \\ & & & d_{i+1,i} \\ 0 & & & \ddots \\ & & & & d_{M,i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (54-3)$$

تتمتع المصفوفات \mathbf{D}_i و \mathbf{Z} بالخصائص التالية:

$$\mathbf{D}_i \hat{\mathbf{m}} = \mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T \quad (55-3)$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{Z}) \cdot \mathbf{1} = \mathbf{1} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{1} = 0$$

تصبح (51-3) بعد الضرب بـ μ_i والاستفادة من خواصها السابقة يكون لدينا:

$$\mu_i \mathbf{S} \boldsymbol{\theta} = \mu_i \boldsymbol{\delta} \quad (56-3)$$

وبالتالي يمكن إيجاد الشعاع $\boldsymbol{\theta}$ باستخدام أي مقدر LS جيد على مجموعة المعادلات الخطية (56-3). أحد الحلول

closed-form يعطى كالتالي:

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{S}^T \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \boldsymbol{\delta} \quad (57-3)$$

ومن الممكن إيجاد الحل باستخدام WLS [21].

جرى النقاش السابق باعتبار القياسات $d_{j,i}$ خالية من الضجيج، وبالتالي يجب تحليل أثر الضجيج على تقدير الموقع. باعتبار

أن القياسات تخضع لضجيج غوسي أبيض جمعي. متوسط معدوم ومصنوفة تغاير \mathbf{Q} (58-3) فإن شعاع الموقع الناتج يكون

$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}$ ، حيث $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ شعاع الخطأ.

$$\mathbf{Q} = \text{Diag}\{\sigma^2\}, \quad \sigma^2 = [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{M-1}^2]^T \quad (58-3)$$

وبالتالي يكون الانحياز (Bias) الناتجة عن شعاع الخطأ $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ وتغير المصفوفة μ_i بسبب ضجيج القياس [21]:

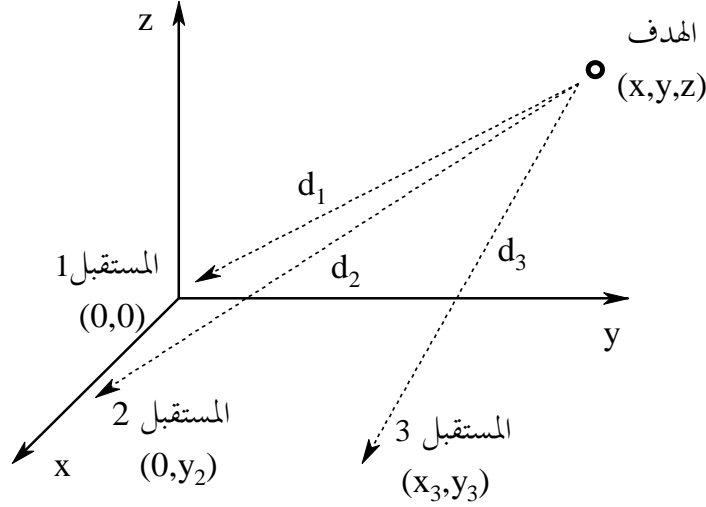
$$\text{Bias} = E[\tilde{\boldsymbol{\theta}}] = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{K} - \boldsymbol{\theta} \quad (59-3)$$

حيث

$$\mathbf{H} = E[\mathbf{S}^T \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \mathbf{S}] = \mathbf{S}^T \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \text{Diag}\{\mathbf{D}_i \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \mathbf{D}_i\} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{S}$$

$$\mathbf{K} = E[\boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \boldsymbol{\delta}] = \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \boldsymbol{\delta} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \sigma^2 + \text{Diag}\{\mathbf{D}_i \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\mu}_i \mathbf{D}_i\} \cdot \sigma^2 \odot \boldsymbol{\delta} \quad (60-3)$$

حالة خاصة من [21] هي عندما يحتوي النظام على ثلاث محطات استقبال فقط وموزعة جغرافياً بشكل عشوائي وهي الحالة التي ناقشها Fang في [23]. اعتبر Fang محطة الاستقبال الأولى كمحطة مرجعية ومتوضعة في مركز الإحداثيات (0,0)، في حين تتوضع المحطة الثانية في الموقع (0,y₂)، والمحطة الثالثة في (x₃, y₃)، وذلك موضح في الشكل 2-3.



الشكل 2-3: مواقع محطات الاستقبال في نظام Fang.

الحل هو عبارة عن حل مباشر لجملة المعادلات (51-3) ويعطى كالتالي:

$$y = g \cdot x + h \quad (61-3)$$

$$d \cdot x^2 + e \cdot x + f = 0 \quad (62-3)$$

حيث

$$g = \{d_{1,3}(x_2/d_{1,2}) - x_3\}/y_3 \quad (63-3)$$

$$h = \{c^2 - d_{1,3}^2 + d_{1,3}d_{1,2}(1 - (x_2/d_{1,2})^2)\}/2y_3 \quad (64-3)$$

$$d = -\{1 - (x_2/d_{1,2})^2 + g^2\} \quad (65-3)$$

$$e = y_2\{1 - (x_2/d_{1,2})^2\} - 2g \cdot h \quad (66-3)$$

$$f = (d_{1,2}^2/4)(1 - (x_2/d_{1,2})^2)^2 - h^2 \quad (67-3)$$

$$c^2 = x_3^2 + y_3^2 \quad (68-3)$$

ويمكن تحديد موقع الهدف 3-D في حال كانت معلومة الارتفاع معلومة من مصدر خارجي [24] كما في نظام SSR ذو النمط C.

$$d.x^2 + e.x + (f - z^2) = 0 \quad (69-3)$$

$$L.y^2 + M.y + (N - z^2) = 0 \quad (70-3)$$

حيث

$$L = d/g^2 \quad (71-3)$$

$$M = e/g - 2dh/g^2 \quad (72-3)$$

$$N = dh^2/g^2 - eh/g \quad (73-3)$$

2.7.3. إجراءات Chan and Ho:

وهو حل غير تكراري وقادر على الوصول إلى الأداء الأمثل من أجل محطات استقبال موزعة بشكل عشوائي. عندما تكون أخطاء تقدير TDOA صغيرة فإن هذه الطريقة هي تقريب لمقدّر ML. تقوم هذه الإجراءات بتقدير الجاهيل d_s و θ بشكل مترابط وذلك أن هذين المعاملين مستقلين عن بعضهما، وبالتالي توول معادلة شعاع تابع الخطأ الأمثل (50-3) كالتالي:

$$\varepsilon = h - G_a Z_a^0 \quad (74-3)$$

حيث يعبر $\{*\}^0$ عن القيمة الحالية من الضجيج لـ $\{*\}$ ، بالإضافة إلى:

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} d_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ d_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \vdots \\ d_{M,1}^2 - K_M + K_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & d_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & d_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M,1} & y_{M,1} & d_{M,1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z}_a = [x, y, d_1]^T \quad (75-3)$$

وذلك من أجل $K_i = x_i^2 + y_i^2$ ، المحطة الأولى كمحطة مرجعية. ومدى الهدف بالنسبة لنقطة مرجعية هو d_1 (مدى الهدف عن محطة الاستقبال الأولى).

تعطى مصفوفة تغاير شعاع الخطأ الأمثل في (74-3) كمايلي

$$\xi = E[\varepsilon \varepsilon^T] = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B} \quad (76-3)$$

حيث $B = \text{diag}\{d_2, d_3, \dots, d_M\}$ و Q مصفوفة تغاير ضجيج القياسات.

يعتمد الحل في طريقة Chan and Ho على اعتبار عناصر الشعاع Z_a غير مرتبطة ببعضها، وبالتالي يمكن إجراء تقدير LS لإيجاد الناتج الأولي، أما الحل الأخير فيمكن الحصول عليه بفرض العلاقة (1-3) التي تربط عناصر Z_a مع بعضها البعض من أجل هدف ثنائي البعد و $i = 1$. إن الخطوتين السابقتين هما تقريب لتقدير ML حقيقي لموقع الهدف.

يعطى الحل الأولي للشعاع Z_a بالعلاقة:

$$Z_a = (G_a^T \xi^{-1} G_a)^{-1} G_a^T \xi^{-1} \cdot h \quad (77-3)$$

والذي هو عبارة عن حل LS معمم لـ (74-3). المعادلة (77-3) غير ممكنة الحل وذلك لأن ξ مجهول وذلك لأن المصفوفة B تحتوي على المسافات الحقيقية بين الهدف ومحطات الاستقبال. بالتالي يجب إجراء تقريب من أجل جعل المسألة قابلة للحل. إذا كان الهدف بعيد عن محطات الاستقبال، أي d_i^0 قريبة من d^0 وبذلك يكون $B = d^0 I$ ، حيث d^0 مصفوفة المسافات و I مصفوفة واحدة بحجم $(M-1)$. وبما أن تقييس ξ لا يؤثر على الجواب فإن تقريب (77-3) هو:

$$Z_a = (G_a^T Q^{-1} G_a)^{-1} G_a^T Q^{-1} \cdot h \quad (78-3)$$

أما في حال كان الهدف قريب فإنه يمكن استخدام (78-3) لإيجاد حل أولي لتقدير B . ومن ثم يمكن الحصول على الحل النهائي من (77-3). على الرغم من أن العلاقة (77-3) يمكن أن تكرر للحصول على نتيجة أفضل إلا أن المحاكاة أظهرت أن تطبيق (77-3) مرة واحدة كافٍ لإعطاء حل دقيق. وتعطى مصفوفة تغاير الحل [22]:

$$\text{cov}(Z_a) = (G_a^{0T} \xi^{-1} G_a^0)^{-1} \quad (79-3)$$

يوجد خطأ في ناتج عناصر التقدير السابق بسبب فرضية أن عناصر الشعاع Z_a غير مرتبطة مع بعضها ويمكن التعبير عن خطأ التقدير بالعلاقات التالية:

$$Z_{a,1} = x + e_1, \quad Z_{a,2} = y + e_2, \quad Z_{a,3} = d_1 + e_3 \quad (80-3)$$

ينتج لدينا مجموعة معادلات جديدة وذلك بطرح أول مركبتين لـ Z_a من x_1, y_1 وتربيع الناتج.

$$\varepsilon' = h' - G_a' Z_a' \quad (81-3)$$

حيث

$$\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (Z_{a,1} - x_1)^2 \\ (Z_{a,2} - x_2)^2 \\ Z_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}'_a = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z}'_a = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ [(y - y_1)^2] \end{bmatrix} \quad (82-3)$$

في حين يعبر الشعاع ε' عن عدم الدقة في Z_a . بتعويض (79-3) في (80-3) يكون لدينا

$$\begin{aligned} \varepsilon'_1 &= 2(x - x_1)e_1 + e_1^2 \approx 2(x - x_1)e_1 \\ \varepsilon'_2 &= 2(y - y_1)e_2 + e_2^2 \approx 2(y - y_1)e_2 \\ \varepsilon'_3 &= 2d_1e_3 + e_3^2 \approx 2d_1e_3 \end{aligned} \quad (83-3)$$

التقريب إلى مقدر ML هنا صحيح في حال كانت الأخطاء e_i صغيرة. وتعطى مصفوفة التباير ξ' بالعلاقة:

$$\xi' = E[\varepsilon\varepsilon^T] = 4\mathbf{B}'\text{cov}(z_a)\mathbf{B}' \quad (84-3)$$

$$\mathbf{B}' = \text{diag}\{x^0 - X_1, y^0 - Y_1, d_1^0\}$$

بما أن ξ غوصي، فهذا يقود إلى أن ξ' غوصي أيضاً، وبالتالي فإنّ تقدير ML — \mathbf{Z}'_a يعطى كالتالي:

$$\mathbf{Z}'_a = (\mathbf{G}'_a{}^T \xi'^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} \mathbf{G}'_a{}^T \xi'^{-1} \cdot \mathbf{h}' \quad (85-3)$$

المصفوفة ξ' غير معلومة بسبب احتوائها على القيم الحقيقية للموقع. إذا كان الهدف بعيداً فإنه يمكن تقريب مصفوفة

التباير — \mathbf{Z}_a كالتالي:

$$\text{cov}(\mathbf{Z}_a) = c^2 d^{0^2} (\mathbf{G}_a^{0T} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a^0)^{-1} \quad (86-3)$$

وبذلك تصبح (85-3) كالتالي:

$$\mathbf{Z}'_a \approx (\mathbf{G}'_a{}^T \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} (\mathbf{G}'_a{}^T \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{G}'_a) \cdot \mathbf{h}' \quad (87-3)$$

وله مصفوفة تباير

$$\text{cov}(\mathbf{Z}'_a) = (\mathbf{G}'_a{}^T \xi'^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} \quad (88-3)$$

ويكون التقدير النهائي للموقع

$$\mathbf{Z}_p = \bar{\mp} \sqrt{\mathbf{Z}'_a} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (89-3)$$

حيث يجري اختيار الحل الصحيح وفق منطقة التغطية المطلوبة في النظام.

الحالة الخاصة من تقدير Chan and Ho هو عندما يكون عدد مستقبلات النظام ثلاث. ويكون الحل:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} * \left\{ \begin{bmatrix} d_{2,1} \\ d_{3,1} \end{bmatrix} d_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ d_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (90-3)$$

حيث $K_i = x_i^2 + y_i^2$. الموقع الناتج x, y يحتوي على المجهول d_1 ، يجري تعويض الناتج في (1-3) من أجل $i = 1$.

ينتج بذلك معادلة بمجهول وحيد d_1 . بإيجاد قيمة d_1 يمكن إيجاد إحداثيات الموقع الناتجة عن حل المعادلة (90-3).

هناك إجراءات أخرى شائعة تدرج تحت نماذج المعطيات العددية، منها إجرائية Spherical-Interpolation (SI)

[28-29]، وإجرائية Spherical-Intersection (SX) [30]. العلاقة الأساسية التي تنطلق منها الإجرائيتين السابقتين هي:

$$d_i^2 = (d_{i,1} + d_1)^2 \quad (91-3)$$

والتي من الممكن أن تكتب على النحو:

$$d_{i,1}^2 + 2d_{i,1}d_1 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y + x^2 + y^2 \quad (92-3)$$

حيث $Y_{i,1} = Y_i - Y_1$ ، $X_{i,1} = X_i - X_1$.

تقوم إجرائية SX باعتبار d_1 معلومة في (92-3) وتقوم بحل x, y بدلالة d_1 . وبإجراء تقدير LS للعلاقة (1-3) يمكن إيجاد d_1 من ثم x, y . بينما يجري في SI إيجاد x, y بدلالة d_1 ومن ثم التعويض في (92-3) وذلك لتشكيل معادلات من مجهول وحيد d_1 . يمكن إيجاد المجهول d_1 بإجراء تقدير LS على جملة المعادلات الناتجة ومن ثم يمكن إيجاد x, y . إنَّ إجرائية SI تعطي درجة مناعية أعلى للضجيج من SX [25]. وعلى الرغم من أن SI تعطي أداءً أفضل من SX، إلا أنها تفترض أن المتحولات x, y, d_1 مستقلة عن بعضها وتقوم بإزالة d_1 من المعادلات، ولذلك فإن الحل الناتج Suboptimal، وذلك بسبب تجاهل هذه العلاقة بين المتحولات.

تؤمّن إجراءات تقدير الموقع السابقة مستويات دقة وتعقيد مختلفة، حيث أن إجرائية Taylor-Series تعطي تقدير موقع دقيق من أجل مستويات ضجيج معقولة وقابلة للتطبيق من أجل أي عدد من قياسات فروق المدى. إلا أنَّها مكلفة حسابياً. أمّا إجرائية Friedlander فتقوم بتخفيض المتطلبات الحسابية لإيجاد الحل، وهي suboptimal لأنها تلغي العلاقة الأساسية في الحل. أمّا بالنسبة لإجرائية Chan and Ho فهي تعطي حل Closed-form، وبالتالي لا يوجد حاجة للتكرار.

بالمقابل هناك حاجة لمعلومات ابتدائية (أولية) من أجل إزالة الالتباس الناتج. إن إجرائية تحديد الموقع الأمثلية من أجل نظام معين تعتمد على الهندسة الجغرافية للنظام، عدد أبعاد الهدف المراد إيجادها، قياسات فروق المدى المستخدمة، بالإضافة إلى المتطلبات الحاسوبية والتعقيد، والفرضيات على الطبيعة الإحصائية للقناة والدقة المرغوبة.

8.3. قياس دقة إجرائيات تحديد الموقع:

هناك العديد من القياسات الممكنة لتقييم (Evaluate) دقة إجرائيات تحديد الموقع، ومن هذه القياسات المقارنة بين الخطأ التربيعي Mean Square Error (MSE) لموقع الهدف المقدّر و الخطأ التربيعي النظري بالاعتماد على الحدود الدنيا للتشتت والتي يعبر عنها Cramer-Rao Lower Band (CRLB). بالإضافة إلى قياس GDOP والذي يقيس أثر التوزع الجغرافي لمحطات الاستقبال على دقة الموقع المقدّر.

1.8.3 CRLB وقياس الخطأ التربيعي:

يمكن تعريف CRLB على أنه الحدود الدنيا النظرية لتشتت أي مقدّر غير منحاز من أجل أي معامل تقدير مجهول ويعتمد بشكل أساسي على مواقع محطات الاستقبال، الموقع الأصلي، وتشتت ضجيج القياسات [27]. فإذا كان θ شعاع مجاهيل غير معلومة وغير مزاحة لمعاملات التوزع $p(r, \theta)$ لتحويل عشوائي r . وعلى اعتبار $\hat{\theta}$ تقدير θ ، فإن CRLB يعطى كالتالي

$$\text{var}(\hat{\theta}) \geq I(\theta)^{-1} \quad (93-3)$$

حيث $I(\theta)$ تعبر عن مصفوفة معلومات Fisher information matrix (FIM) والتي تعطى بالعلاقة:

$$I(\theta) = -E \left[\frac{\partial^2 \log p(r, \theta)}{\partial \theta^2} \right] \quad (94-3)$$

وتعطى علاقة CRLB كما في [22]

$$I(\theta)^{-1} = c^2 (A^T N^{-1} A)^{-1} \quad (95-3)$$

حيث A معرفة في (26-3) من أجل $(x, y, d_i) = (x^0, y^0, d_i^0)$ ، والتي هي عبارة عن موقع الهدف و N مصفوفة تغاير TDOA. إن مجموع العناصر القطرية لـ $I(\theta)^{-1}$ يعطي الحدود الدنيا النظرية على MSE لمقدّر تحديد الموقع. عملياً، قد لا تكون المصفوفة N معلومة. وبالتالي إذا كانت الكثافة الطيفية للاستطاعة Power Spectral Density (PSD)

متشابهة عند المستقبلات، فإنه من الممكن استخدام مصفوفة تغاير TDOA النظرية بعناصر قطرية σ_d^2 و $0.5\sigma_d^2$ لباقي عناصر المصفوفة، حيث σ_d^2 هو تشتت تقدير TDOA [25].

من أجل قياس دقة إجرائية تحديد الموقع فإنه يجري مقارنة MSE النظرية بالاعتماد على CRLB مع القيمة العملية، حيث أن الطريقة التقليدية لقياس MSE من أجل تقدير هدف 2-D هي

$$MSE = \varepsilon = E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2] \quad (96-3)$$

حيث \hat{x}, \hat{y} الموقع المقدّر للهدف الموجود في x, y .

الفصل الرابع

المحاكاة والنتائج

SIMULATION AND RESULT

1.4. تمهيد

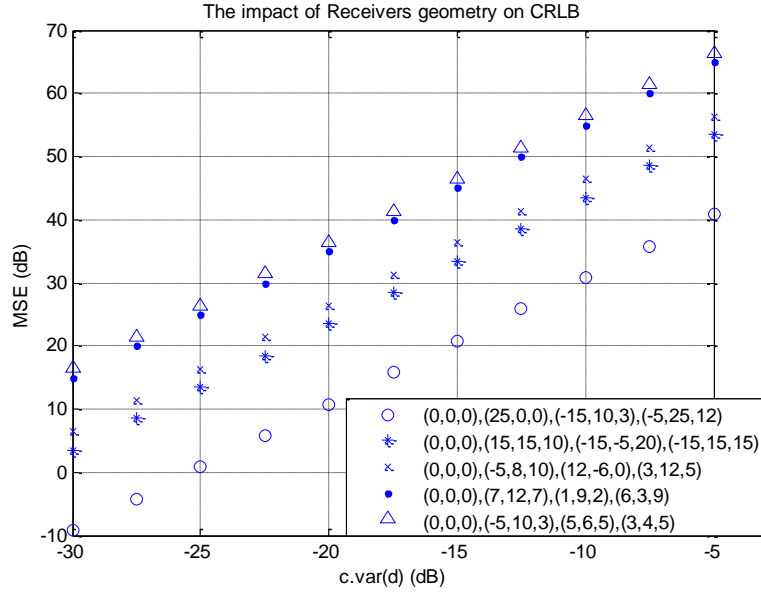
نجري في هذا الفصل مقارنة لأداء إجراءات تحديد الموقع المختلفة وفق معيار CRLB باستخدام Matlab 13a. كما نقوم بتحري إمكانية تصميم نظام MLAT بثلاث مستقبلات فقط. نقوم أخيراً بتصميم واجهة تخطبية من أجل دراسة أثر دقة ساعة نظام MLAT على أداء إجراءات تحديد الموقع. سنقوم بالمقارنة بين الإجراءات (Foy, Friedlander, Chan and HO) من أجل عدد مستقبلات أكبر من 3، والإجراءات (Foy, Fang, Chan and Ho) من أجل عدد مستقبلات مساوٍ لـ 3. للقيام بالمحاكاة، نفترض للتبسيط، أن الإشارات والضجيج white random processes وأن نسبة الإشارة للضجيج على دخل محطات الاستقبال متطابقة. يتم حساب مصفوفة التغير Q نظرياً (الفقرة 1.8.3). نقوم بتوليد الفروقات الزمنية للوصول إلى المستقبلات بناءً على موقع الهدف.

قبل البدء بعملية المحاكاة نقوم بدراسة أثر الهندسة الجغرافية للنظام على معيار CRLB النظري. للقيام بذلك نفترض أن الهدف يقع في الموقع Km $(x = -50, y = 250, z = 30)$ على سبيل المثال ونثبت عدد المستقبلات ونقوم بتغيير مواقعها بشكل عشوائي ونقوم بحساب قيمة PDOP لكل موقع. يبين الجدول 1-4 خمس تشكيلات مختلفة لمحطات استقبال النظام مع قيمة PDOP لكل منها.

من الملاحظ أنه بحساب CRLB من أجل التشكيلات المختلفة لمواقع محطات الاستقبال ينتج الشكل 1-4 والذي يبين أن قيمة التشتت الأصغري الممكن تحقيقها تنخفض كلما انخفضت قيمة PDOP، بمعنى آخر أنه كلما كانت الهندسة الجغرافية للنظام أفضل كلما كان أداء النظام النظري أفضل. كما يُلاحظ وجود علاقة بين قيمة PDOP ومقدار انخفاض التشتت الأصغري، فالتشكيلات التي لها هندسة جغرافية متقاربة تمتلك منحنيات CRLB متقاربة، وكلما اتسع الفارق بقيمة PDOP أصبحت المنحنيات أكثر بعداً عن بعضها البعض.

الجدول 1-4: مواقع محطات الاستقبال.

PDOP	z (Km)	y (Km)	x (Km)	محطة الاستقبال	التشكيلة
9405	0	0	0	1	1
	3	10	-5	2	
	5	6	5	3	
	5	4	3	4	
7926	0	0	0	1	2
	7	12	7	2	
	2	9	1	3	
	9	3	6	4	
2954	0	0	0	1	3
	10	8	-5	2	
	0	-6	12	3	
	5	12	3	4	
2118	0	0	0	1	4
	10	15	15	2	
	20	-5	-15	3	
	15	15	-15	4	
491	0	0	0	1	5
	0	0	25	2	
	3	10	-15	3	
	12	25	-5	4	

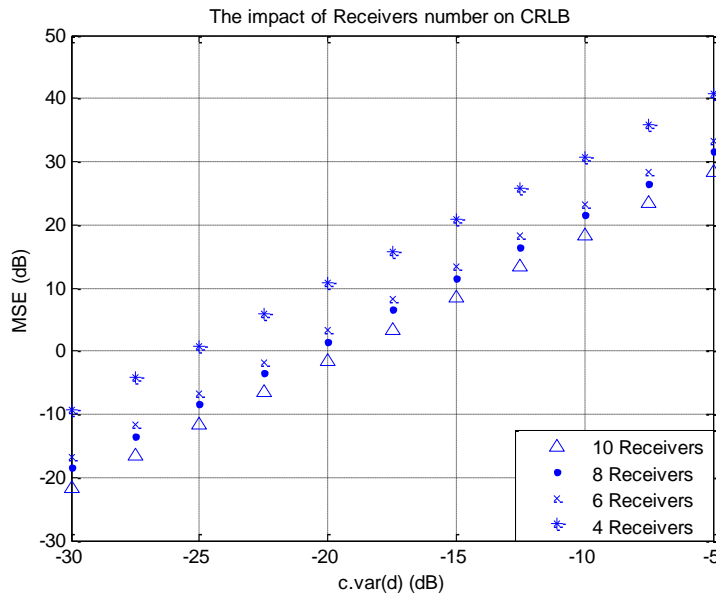


الشكل 1-4: أثر تغير مواقع المستقبلات على معيار CRLB.

نقوم أيضاً بدراسة أثر زيادة عدد محطات الاستقبال في النظام على منحنى CRLB النظري. ذلك أنّ زيادة عدد محطات النظام يؤدي إلى تغير قيمة PDOP وهذا ما يؤثر على قيمة التشتت الأصغري (CRLB). نختار التشكيلة التي أعطت قيمة PDOP الأفضل من الجدول 1-4 ونضيف إليها مستقبلات متوزعة بشكل عشوائي كما يبين الجدول 2-4 ونقوم بحساب PDOP لها، حيث نقوم بزيادة محطة استقبال إضافية ونحسب قيمة PDOP الجديدة ونضيف بعدها محطة أخرى ونعيد الحساب، ونكرر العملية حتى نصل إلى عشر محطات استقبال. يبين الجدول 3-4 قيم PDOP الناتجة من أجل زيادة عدد محطات الاستقبال، ويبين الشكل 2-4 منحنيات CRLB الناتجة من أجل 4، 6، 8، 10 محطات استقبال.

الجدول 2-4: مواقع محطات الاستقبال.

z (Km)	y (Km)	x (Km)	محطة الاستقبال
0	0	0	1
0	0	25	2
3	10	-15	3
12	25	-5	4
7	0	-25	5
2	-15	5	6
0	-35	0	7
10	-25	-25	8
0	25	25	9
10	-15	5	10



الشكل 2-4: أثر تغير عدد المستقبلات على معيار CRLB.

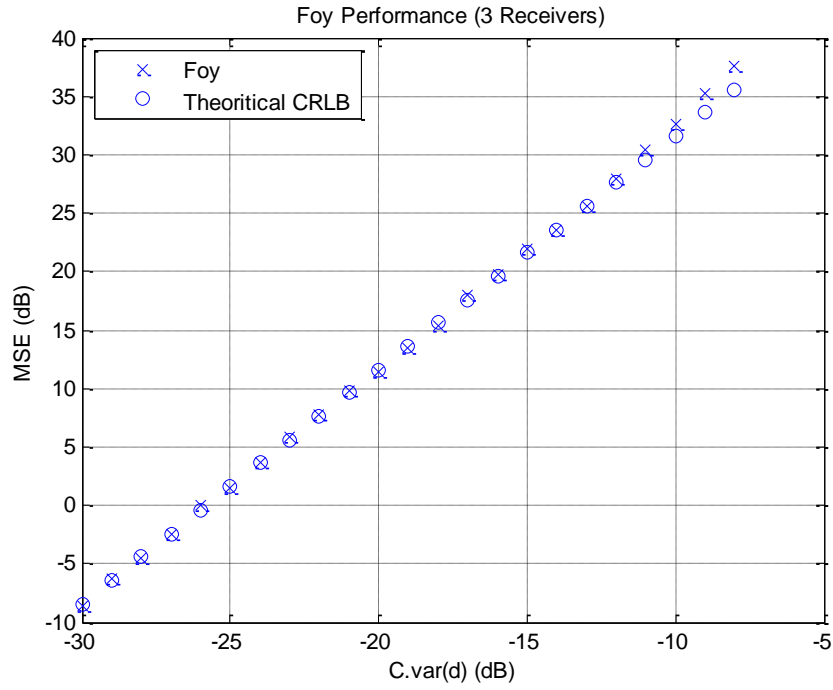
الجدول 4-3: علاقة PDOP بعدد محطات النظام.

PDOP	عدد المستقبلات
502	3
491	4
222	5
207	6
198	7
168	8
122	9
117	10

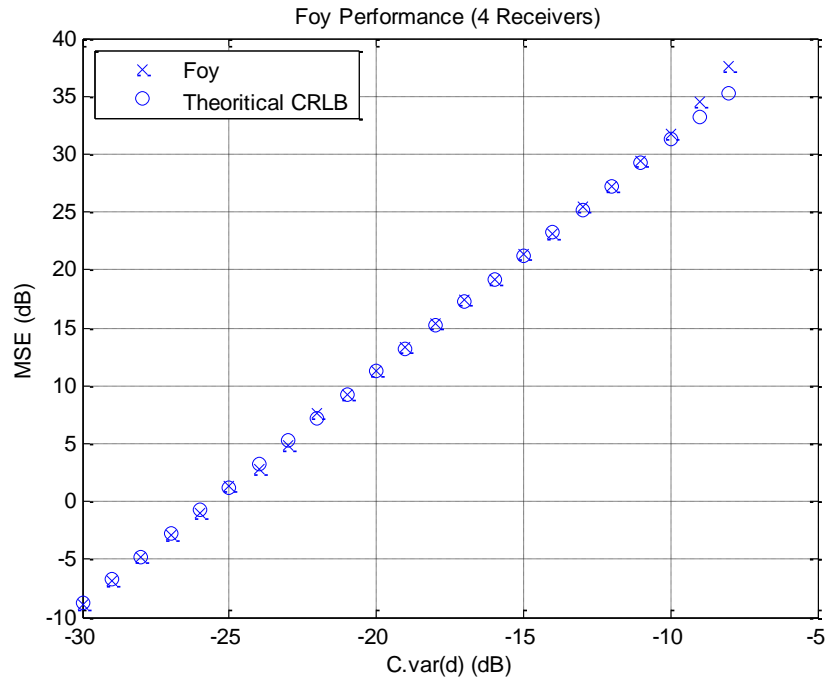
بناءً على ماسبق نقوم باعتماد مواقع محطات الاستقبال الموجودة في الجدول 4-2 وذلك من أجل محاكاة أداء إجراءات تحديد الموقع المختلفة.

2.4. إجراءات Foy:

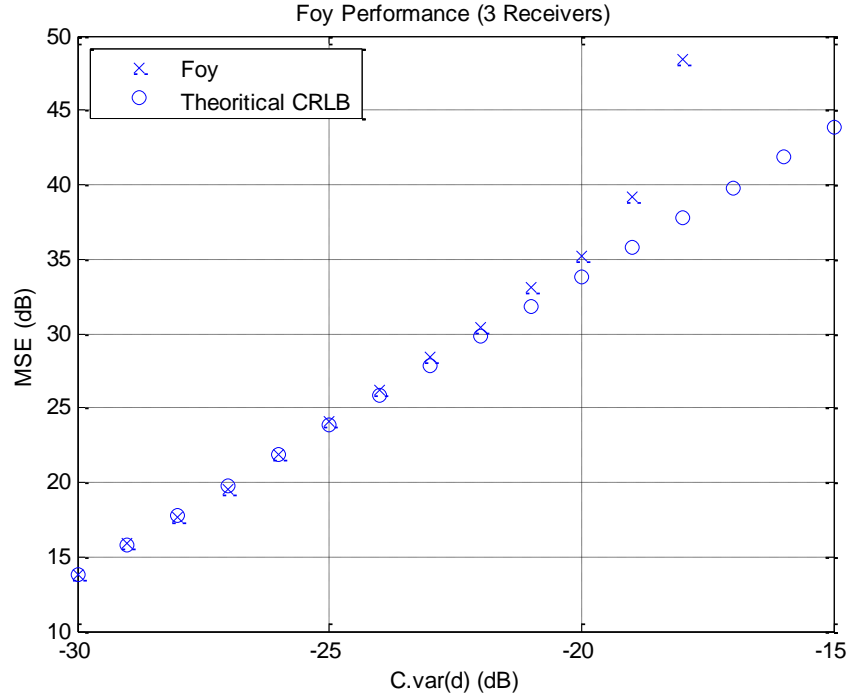
تعتبر إجراءات Foy مثلاً على نماذج المعطيات الإحصائية لإجراءات تحديد الموقع والتي تلجأ في تقدير الموقع إلى الطرق التكرارية. قمنا بإجراء المحاكاة من أجل تقدير أولي قريب من موقع الهدف من أجل ضمان التقارب. يبين الشكل 4-3 الأداء من أجل 3 محطات استقبال (تقدير موقع 2-D)، في حين يبين الشكل 4-4 الأداء من أجل 4 محطات استقبال (تقدير موقع بثلاثة أبعاد 3-D). نلاحظ أن أداء Foy يتقارب من قيمة CRLB في الحالتين، حيث أن أداء Foy من أجل موقع ثلاثي الأبعاد يصل إلى الحدود النظرية الدنيا للثشتت من أجل قيم مرتفعة من الضجيج. يمكن على الجانب الآخر دراسة أداء Foy من أجل هندسة جغرافية مختلفة (قيمة PDOP مرتفعة). نقوم لذلك بتغيير مواقع محطات الاستقبال ونأخذ على سبيل المثال التشكيلة الثالثة لمحطات الاستقبال من الجدول 4-1 والتي تمتلك قيمة $PDOP = 2954$ ، ونعيد محاكاة أداء Foy من أجل ثلاث مستقبلات. فنجد في الشكل 4-5 أن منحنى الأداء تغير عن الحالة الأولى وأصبح أسوأ من أجل قيم مرتفعة من الضجيج إلا أن المنحنى لازال يتقارب من القيمة الدنيا للثشتت الأصغري من أجل قيم منخفضة للضجيج. ومع ذلك فإن أداء النظام من أجل هندسة جغرافية جيدة يبقى الأفضل لكون القيمة الدنيا للثشتت الأصغري تنخفض بحد ذاتها لتسمح للنظام بأن يحقق أداء أفضل.



الشكل 3-4: أداء إجرائية Foy من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 502).



الشكل 4-4: أداء إجرائية Foy من أجل 4 محطات استقبال (PDOP = 491).



الشكل 5-4: أداء إجرائية Foy من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 4678).

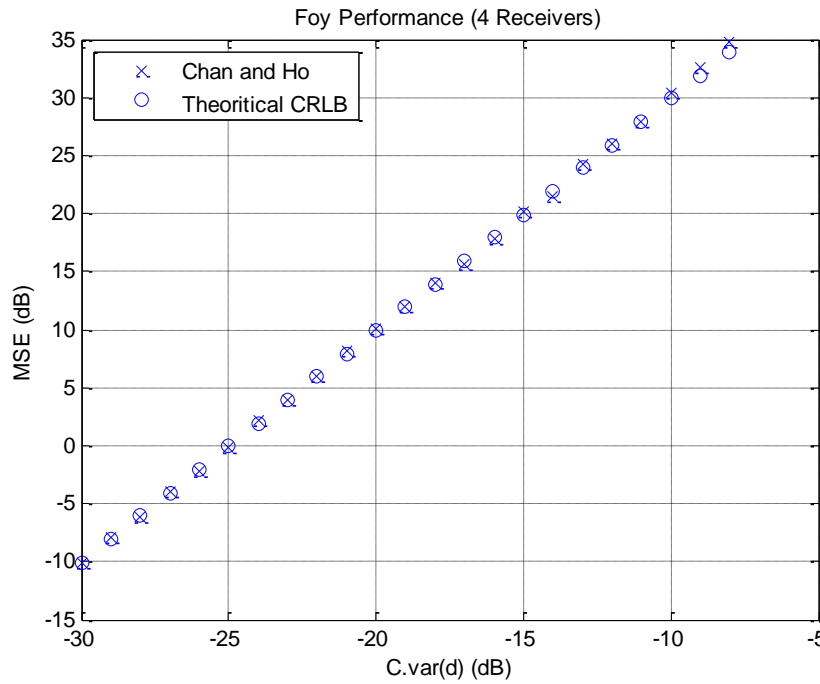
من المفيد هنا دراسة أثر تغيير عدد المستقبلات على عدد عمليات التكرار المطلوبة من أجل تقارب إجرائية Foy من موقع الهدف. يبيّن الجدول 4-4 عدد التكرارات المطلوبة من أجل الحصول على موقع الهدف. نلاحظ من الجدول أنه كلما زاد عدد المستقبلات كلما انخفض عدد عمليات التكرار المطلوبة. فمن أجل 7 مستقبلات يكفي 2 عملية تكرار للحصول على النتيجة المطلوبة عند مستويات ضجيج منخفضة. من الجدير بالذكر هنا أنّ عدد عمليات التكرار يتأثر بالعديد من العوامل، كمواقع محطات الاستقبال والتقدير الأولي لموقع الهدف. وبالتالي فإن عدد التكرارات بحاجة لدراسة جيّدة للهندسة الجغرافية للنظام بالإضافة إلى تحديد طريقة مناسبة لإجراء تقدير أولي لموقع الهدف بحيث يكون قريب قدر الإمكان من الموقع الحقيقي.

الجدول 4-4: عدد التكرارات المطلوبة لتقارب Foy من أجل تقدير أولي هو نفسه موقع الهدف.

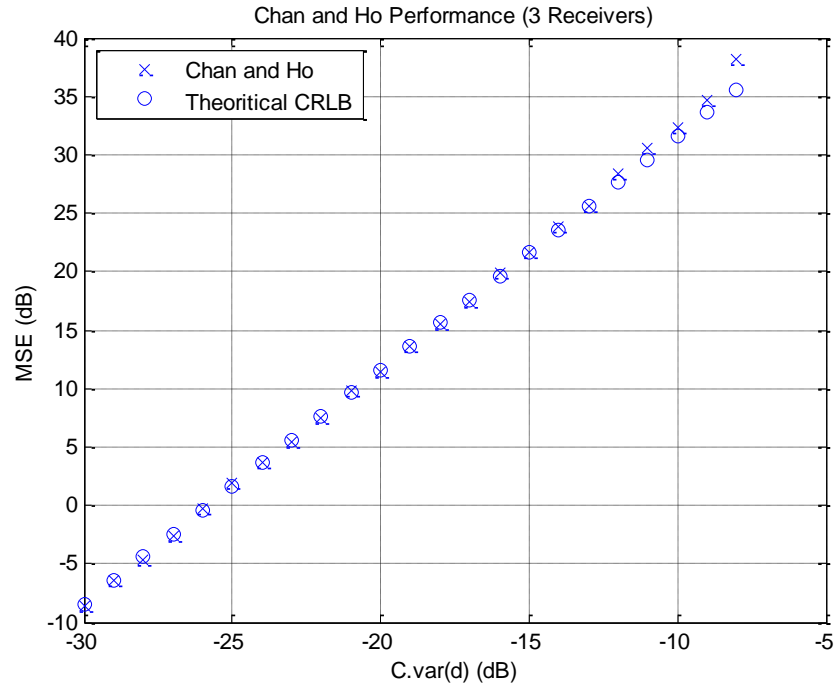
عدد عمليات التكرار المطلوب للحصول على التقارب من أجل				عدد المستقبلات / C.var(d)
c.var (d) =				
-15 (dB)	-20 (dB)	-25 (dB)	-30 (dB)	
6	6	6	6	3
3	3	3	2	4
3	3	2	2	7

3.4. إجرائية Chan and Ho

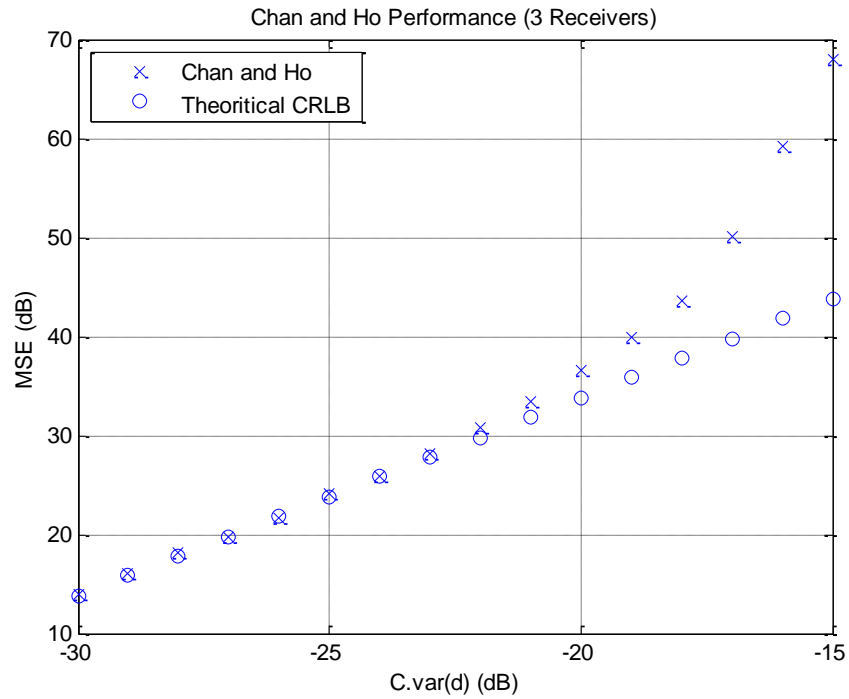
تعتبر إجرائية Chan and Ho من الإجرائيات closed-form، والتي لاتعتمد في عملها على مبدأ التكرارية. وتعطي أداءً جيداً بالمقارنة مع أداء إجرائية Foy. فمن أجل 4 محطات استقبال، يبين الشكل 6-4 أداء Chan and Ho بالمقارنة مع CRLB. في حين يبين الشكل 7-4 الأداء من أجل 3 مستقبلات. يكمن الاختلاف بين هذه الإجرائية وسابقتها أن إجرائية Chan and Ho ليست بحاجة لمعرفة توقع مبدئي لموقع الهدف إلا أنها تعاني من مشكلة إعطاء أكثر من حل لموقع الهدف، وعادةً ما يتم إزالة هذا الالتباس عن طريق الحصول على معلومات أولية عن الهدف من مصدر آخر للمساعدة في تحديد النتيجة الصحيحة للموقع. قمنا بإجراء المحاكاة في الأشكال 6-4 و 7-4 لإجرائية Chan and Ho من أجل هندسة جغرافية جيدة. نلاحظ أن منحنى الأداء يقترب من CRLB حتى من أجل استطاعة ضجيج مرتفعة، تماماً كما هو الحال في إجرائية Foy. أما في حال هندسة جغرافية سيئة فيبين الشكل 8-4 أداء Chan and Ho من أجل 3 محطات ونلاحظ أن منحنى الأداء يقترب من CRLB من أجل استطاعة الضجيج المنخفضة ويتعد بشكل كبير كلما ارتفعت استطاعة الضجيج.



الشكل 6-4: أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 4 محطات استقبال (PDOP = 491).



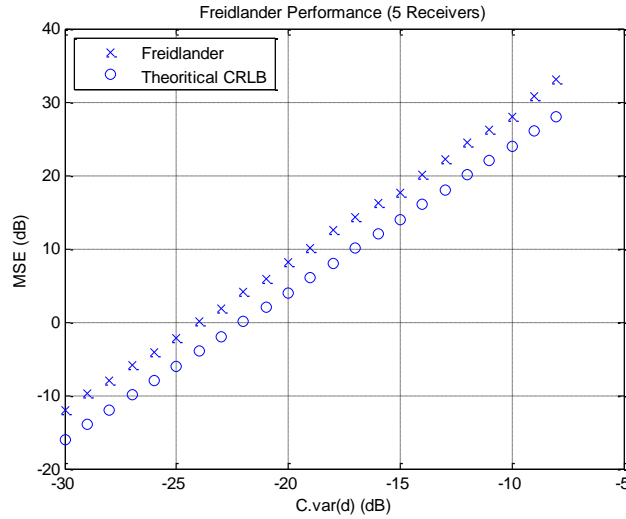
الشكل 4-7: أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 502).



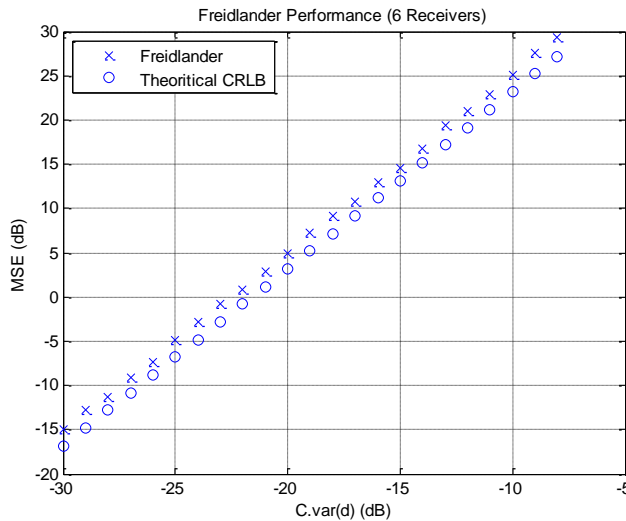
الشكل 4-8: أداء إجرائية Chan and Ho من أجل 3 محطات استقبال (PDOP = 4678).

4.4. إجرائية Friedlander

قمنا بمحاكاة هذه الإجرائية من أجل حالتين، الأولى باستخدام 5 مستقبلات كما يبين الشكل 4-9، والثانية من أجل 6 مستقبلات كما يبين الشكل 4-10. نلاحظ من نتيجة المحاكاة أن منحي الأداء مطابق تماماً لمنحي CRLB لكن مع وجود إنحياز تنخفض قيمتها من أجل عدد مستقبلات أكبر.

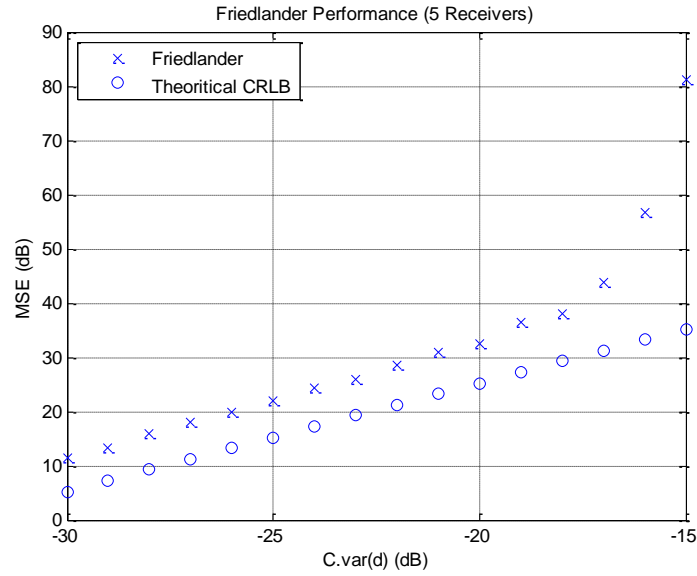


الشكل 4-9: أداء إجرائية Friedlander من أجل 5 محطات استقبال (PDOP = 222).

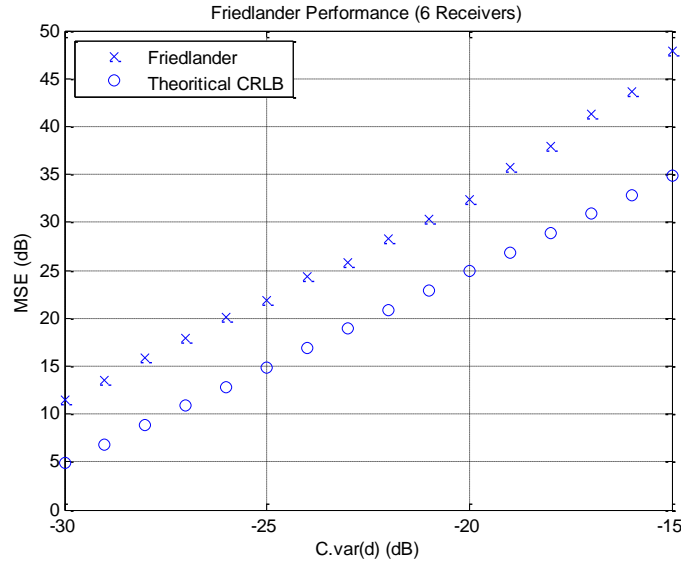


الشكل 4-10: أداء إجرائية Friedlander من أجل 6 محطات استقبال (PDOP = 207).

مما يؤثر أيضاً على قيمة الإزاحة بشكل كبير هو الهندسة الجغرافية للنظام، حيث تبين الأشكال 11-4 و 12-4 أداء Friedlander من أجل 5 و 6 مستقبلات ذات PDOP مرتفعة على الترتيب، فنلاحظ أن مقدار الإزاحة أصبح أكبر في كلا الحالتين، كما أن الأداء من أجل قيم الضجيج المرتفعة أصبح أكثر ابتعاداً عن منحنى CRLB.

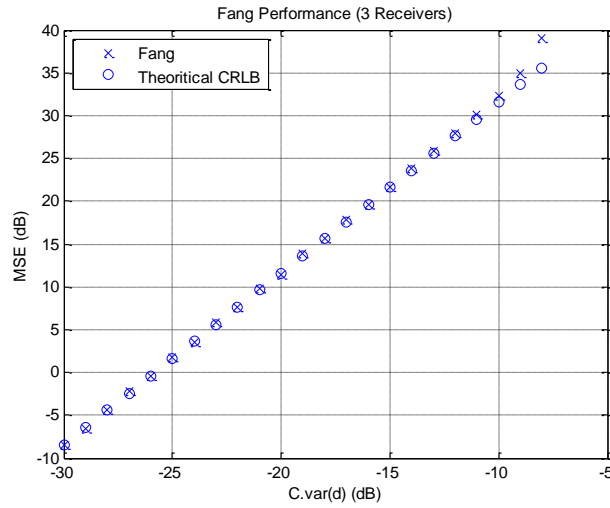


الشكل 11-4: أداء إجرائية Friedlander من أجل 5 محطات استقبال (PDOP = 1984).

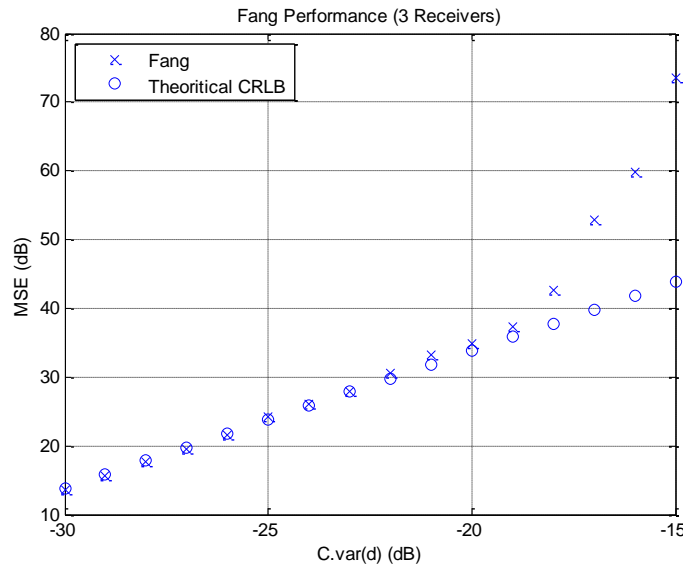


الشكل 12-4: أداء إجرائية Friedlander من أجل 6 محطات استقبال (PDOP = 1970).

أما بالنسبة إلى الحالة الخاصة لإجرائية Friedlander والتي تعالج عدد مستقبلات 3، والمطابقة لإجرائية Fang، فهي تقوم على مبدأ الحل المباشر لجملة معادلات تحديد الموقع وبالتالي فإن موقع الهدف في هذه الحالة لا يعاني من إزاحة، وهذا ما يبدو في نتيجة المحاكاة لهذه الحالة في الشكل 4-13. كما يمكن ملاحظة أن أداء إجرائية Fang مكافئ لأداء إجرائية Chan and Ho و Foy من أجل 3 مستقبلات. وكما هو الحال بالنسبة لجميع الإجراءات السابقة فإن الأداء يسوء عندما تتوزع المستقبلات بشكل سيء كما في الشكل 4-14.



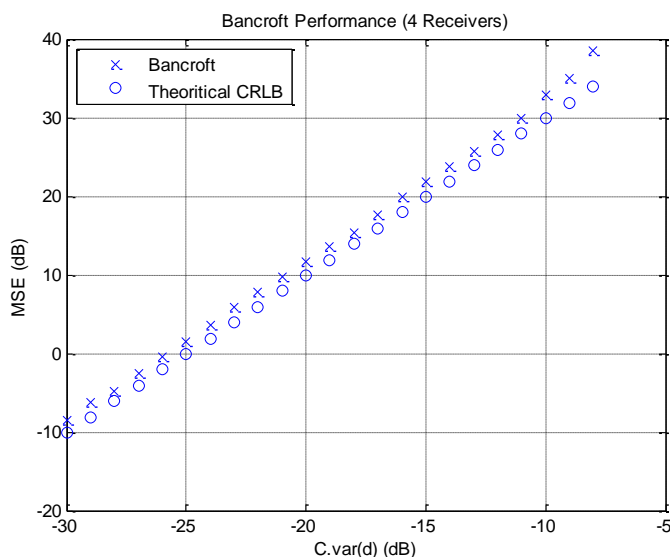
الشكل 4-13: أداء إجرائية Fang (PDOP = 502).



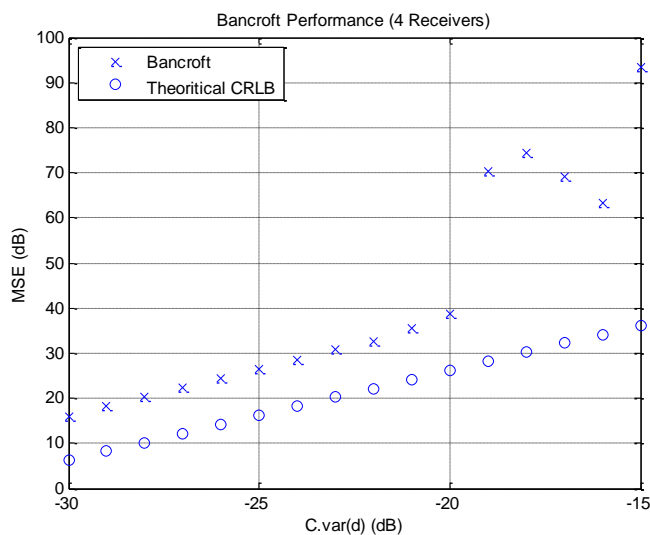
الشكل 4-14: أداء إجرائية Fang (PDOP = 4678).

5.4. إجرائية Bancroft

وهي إحدى إجرائيات نماذج المعطيات الجبرية. تعطي هذه الإجرائية حلاً مزاحاً وغير أمثلي إحصائياً. قمنا بإجراء محاكاة لهذه الإجرائية باستخدام 4 محطات استقبال. يبين الشكل 4-15 أداء هذه الإجرائية، حيث نلاحظ الإزاحة واضح. ويتغير مقدار الإزاحة بتغير قيمة PDOP كما هو واضح في الشكل 4-16، حيث ازدادت قيمة الإزاحة بزيادة PDOP.



الشكل 4-15: أداء إجرائية Bancroft (PDOP = 492).



الشكل 4-16: أداء إجرائية Bancroft (PDOP = 2954).

6.4. نظام MLAT سلمي بثلاث مستقبلات لتحديد موقع هدف بثلاث أبعاد

نعلم مما سبق أن ثلاث محطات استقبال (معادلي TDOA) لا يمكنها أن تحدد إحداثيات هدف بأبعاد ثلاثة، إلا أنه في حال معرفة معلومة الارتفاع من مصدر خارجي فإنه يمكن للنظام تحديد البعد الثالث للهدف وتصحيح موقعه (كما في إجرائية Fang).

يمكن الحصول على معلومة الارتفاع عبر فك الإشارة المرسله من الهدف (إشارة المحيبي). حيث أن بعض إشارات الأنظمة التي يتعامل معها نظام MLAT تحتوي على معلومة الارتفاع (النمط C في نظام SSR، الصيغ DF4 و DF20 من جواب النمط S، إشارة ADS-B). وهذه الإشارات ترسل بشكل مستمر طوال فترة رحلة الطائرة (الهدف).

المشكلة الأساسية التي تظهر لدينا في النظام هي مسألة الالتباس بين إشارات الأنماط C و A حيث أن النمطين يتمتعان بنفس شكل الإشارة (الشكل 2-11) والاختلاف الوحيد هو أن النبضة D1 غير مستخدمة في النمط C وبالتالي فإنه يوجد التباس في نمط الإشارة من أجل 50% من إشارات نظام SSR (النمط A له 4096 إشارة تعريف مختلفة، في حين يمتلك النمط C 2048 إشارة). عندما يستقبل نظام MLAT السلمي إشارة SSR فهو لا يعلم هل هذه الإشارة إشارة ارتفاع (النمط C) أم إشارة تعريف طائرة (النمط A). حيث أن الإشارة التي يحتاجها نظام MLAT لملاحقة الهدف أو تتبع مساره هي إشارة التعريف الخاصة به، والتي لا تتغير طيلة فترة الملاحقة. وبالتالي لانرغب أن يقوم النظام بتتبع إشارة نمط الارتفاع على أنها هي إشارة التعريف.

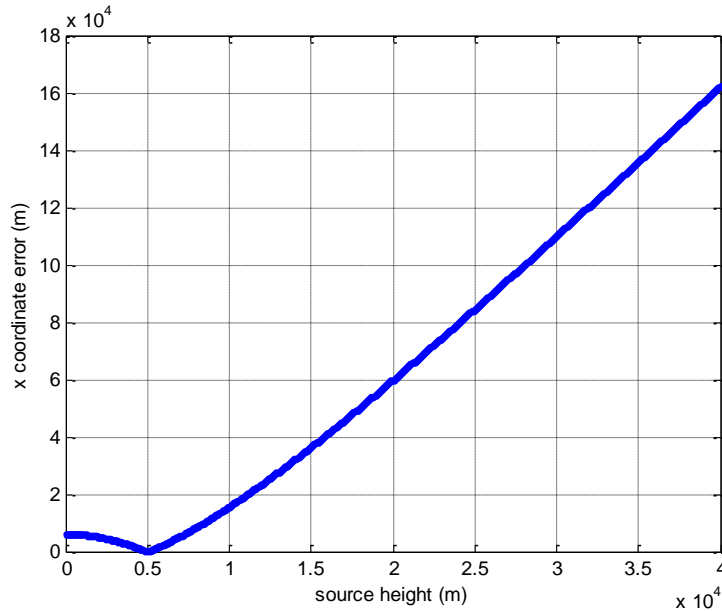
7.4. التخلص من الالتباس بين إشارات النمطين A و C

بشكل عام لا يوجد طريقة محددة للتخلص من الالتباس بين إشارات النمطين A و C إلا عن طريق إجراءات ملاحقة بالنسبة لارتفاع الطائرة المقاس [09]. إلا أنه من أجل هدف يستخدم إشارات SSR فقط فإن إمكانية الحصول على معلومة الارتفاع لن تكون بالأمر السهل في نظام MLAT يعمل بثلاث محطات استقبال فقط.

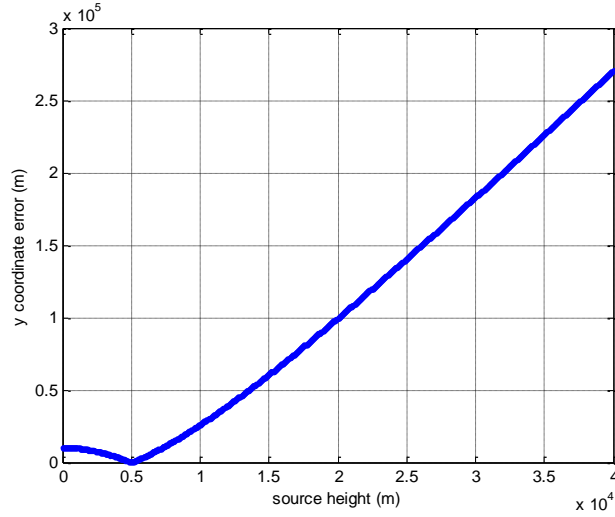
من أجل التخلص من هذه المشكلة قمنا باقتراح طريقة فعالة من أجل إزالة الالتباس عبر تصحيح موقع الهدف باستخدام إجرائيتين مختلفتين لتحديد الموقع. والإجرائيات التي يمكن الاستفادة منها في هذه الحالة هي إجرائيات Chan and Ho و Fang كوفها تعطي أداء جيد عند ضجيج منخفض.

1.7.4. تصحيح موقع الهدف

عندما يجري تحديد موقع هدف في مستوي ثنائي البعد (2-D) في حين أن الهدف موجود في الفراغ (3-D) فإنّ الموقع الناتج سيكون مزاحاً بخطأ تتعلق قيمته بالعديد من المعاملات مثل (ارتفاع الهدف، المسافة الفاصلة بين محطات الاستقبال، وفرق المدى بين الهدف والنظام). تمكّن إجرائيّة Fang من تحديد موقع الهدف إذا عُلم ارتفاعه من مصدر خارجي من المعادلات (69-3) و (70-3)، فمن أجل هدف يطير على ارتفاع 5 Km وفي الإحداثيات (120,200) Km ومحطات استقبال النظام موجودة في المواقع (0,0)، (0,1)، (1,10). للقيام بهذه المهمة نقوم بتغيير معامل ارتفاع الهدف في معادلات تصحيح الموقع لإجرائيّة Fang (69-3، 70-3) بين 0 Km و 40 Km وذلك لمعرفة قيمة الخطأ الناتج في تحديد الموقع عند اختلاف ارتفاع الهدف الحقيقي عن القيمة المستخدمة في معادلات التصحيح لـ Fang. وتوضّح الأشكال 17-4 و 18-4 على الترتيب انعكاس هذا الاختلاف على أخطاء في إحداثيات x و y الناتجة للهدف. نلاحظ أنّ الخطأ معدوم عندما ينطبق ارتفاع الطائرة الحقيقي مع قيمة الارتفاع في المعادلة (96-3) ويزداد الخطأ بزيادة بعد هذه القيمة عن ارتفاع الهدف الحقيقي. وبالتالي فإنّه عندما تكون معلومة الارتفاع خاطئة فإنّ معادلات Fang لاتعطي موقع الهدف ويكون الخطأ في الموقع الناتج تابع لمعلومة الارتفاع التي تم الحصول عليها.

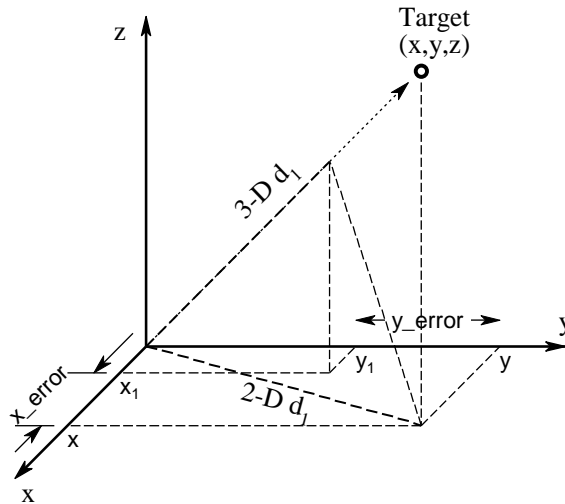


الشكل 17-4: الخطأ في الإحداثيّة x عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف.



الشكل 4-18: الخطأ في الإحداثية y عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف.

أما بالنسبة لإجرائية Chan and Ho فهي لاتعطي إمكانية تصحيح الموقع ولكن تمكننا من حساب قيمة الخطأ الناتج على موقع الهدف من أجل قيم ارتفاع مختلفة من المعادلة (3-90). حيث أن الموقع الناتج باستخدام هذه المعادلة يختلف بارتفاع الطائرة، فإذا كان النظام والهدف يقع في مستوي واحد كان الناتج هو موقع الهدف الصحيح، أما في حال كان الهدف في غير مستوي النظام (زيادة في ارتفاع الطائرة أو نقصان) ينتج خطأ في القياس (الشكل 4-19)، نعبّر عنه بالمتحولين x_error و y_error . يمكن حساب الخطأ الناتج من خلال معرفة ارتفاع الطائرة من مصدر خارجي. وبالتالي في حال كان إرتفاع الهدف معلوم، أصبح بالإمكان تصحيح إحداثيات الهدف x, y كالتالي:



الشكل 4-19: خطأ إحداثيات الهدف الناتج عن ارتفاعه.

$$x_{Chan} = x + x_{error} \quad (1-4)$$

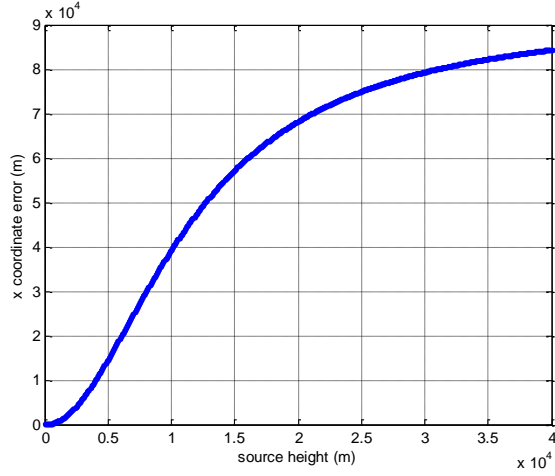
$$y_{Chan} = y + y_{error} \quad (2-4)$$

حيث x, y موقع الهدف الناتج عن الحل باستخدام (90-3). إذاً من أجل تصحيح الناتج وحساب الموقع الدقيق للهدف يجب حساب الخطأ الناتج عن الارتفاع. ويمكن إجراء ذلك كالتالي:

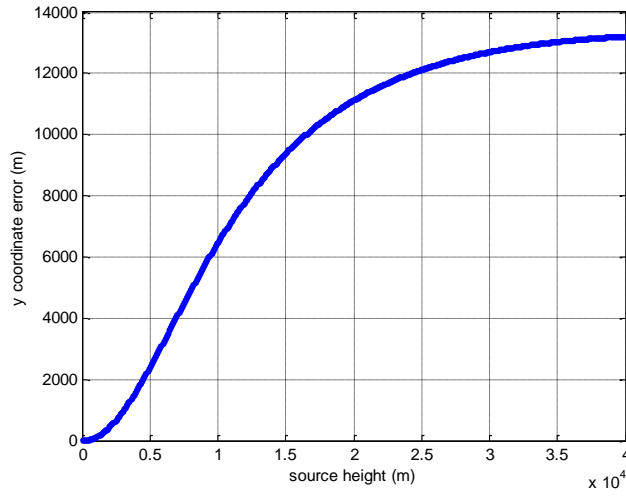
- نقوم بحل (90-3) بالنسبة لـ d_1 ، وتعويض الناتج في (1-3) من أجل $i = 1$ و $z_1 = 0$ و z ارتفاع الهدف.
- نحري حساب d_1 (مدى الهدف بثلاث أبعاد $3D d_1$).
- ثم نقوم بحل (90-3) بالنسبة لـ d_1 ، وتعويض الناتج في (1) من أجل $i = 1$ و $z_1 = z = 0$. في هذه الحالة يكون d_1 هو المدى ببعدين $2D d_1$ (الشكل 12-4).
- بتعويض $2D d_1$ الناتجة في (90-3) نحصل على x_1, y_1 ، وبتعويض $3D d_1$ في (90-3) نحصل على x, y (الشكل 12-4)، ويكون $x_{error} = x - x_1$ و $y_{error} = y - y_1$.

نكرّر العملية السابقة من أجل كل ارتفاع ممكن للهدف. قد تبدو هذه كمشكلة للوهلة الأولى، إلا أن [08] تعرّف المستويات الجوية التي يمكن للطائرة أن تتواجد فيها. بذلك يمكن تحديد موقع هدف جويّ ذو ثلاث أبعاد باستخدام ثلاث محطّات استقبال فقط، وذلك عن طريق حساب مسبق للأخطاء y_{error} و x_{error} ومن ثم تصحيح الموقع الناتج باستخدام (1-4) و (2-4). تبين الأشكال 20-4 و 21-4 خطأ الإحداثيات x و y عند تحديد الموقع باستخدام Chan and Ho في حالة هدف يطير على ارتفاع 5 Km وموجود في (120,200) Km ومحطّات استقبال النظام في المواقع (0,0)، (0,1)، (1,10).

تبين الأشكال السابقة علاقة الخطأ الناتج في تقدير الموقع تبعاً لارتفاع الهدف من أجل إجرائيّة Chan and Ho. تمثّل النقطة (0,0) في الشكلين السابقين الخطأ الناتج عندما يكون الهدف في نفس مستوي النظام (محطّات الاستقبال موجودة على نفس الارتفاع حكماً). ومع ارتفاع الهدف عن مستوي النظام (المحور الأفقي) نلاحظ زيادة قيمة الخطأ في تقدير الموقع، حيث يصل الخطأ في الإحداثيّة x إلى 84 Km تقريباً كحد أقصى في حين يصل الخطأ في الإحداثيّة y إلى 13 Km كحد أقصى. وبالتالي فإنّ أي ارتفاع بسيط للهدف عن مستوي النظام سيؤدي إلى خطأ كبير في الإحداثيّة x يفوق ماقد ينتج من خطأ على الإحداثيّة y .



الشكل 4-20: الخطأ في الإحداثية x عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف (إجرائية Chan and Ho).



الشكل 4-21: الخطأ في الإحداثية y عند تحديد موقع في مستوي كتابع لارتفاع الهدف (إجرائية Chan and Ho).

2.7.4. الطريقة الأولى المقترحة لإزالة الالتباس

يمكن التخلص من الالتباس بين إشارات الأنماط A و C بالاستفادة من تصحيح موقع الهدف كالتالي:

بدايةً يجب أن تكون مواقع محطات الاستقبال كما اقترح Fang في مستو واحد كالتالي:

✓ مستقبل 1: (0, 0).

✓ مستقبل 2: (x2, 0).

✓ مستقبل 3: (x3 , y3).

عند استقبال إشارة A/C نقوم بالخطوات التالية:

- نعتبر أنّ الإشارة المستقبلية من النمط C.
- نقوم باستخراج الارتفاع الموافق للإشارة المستقبلية.
- نقوم بتقدير الموقع باستخدام معادلات تصحيح Fang (69-3) و (70-3) من أجل z هي الارتفاع الذي تم استخراجها من الإشارة.

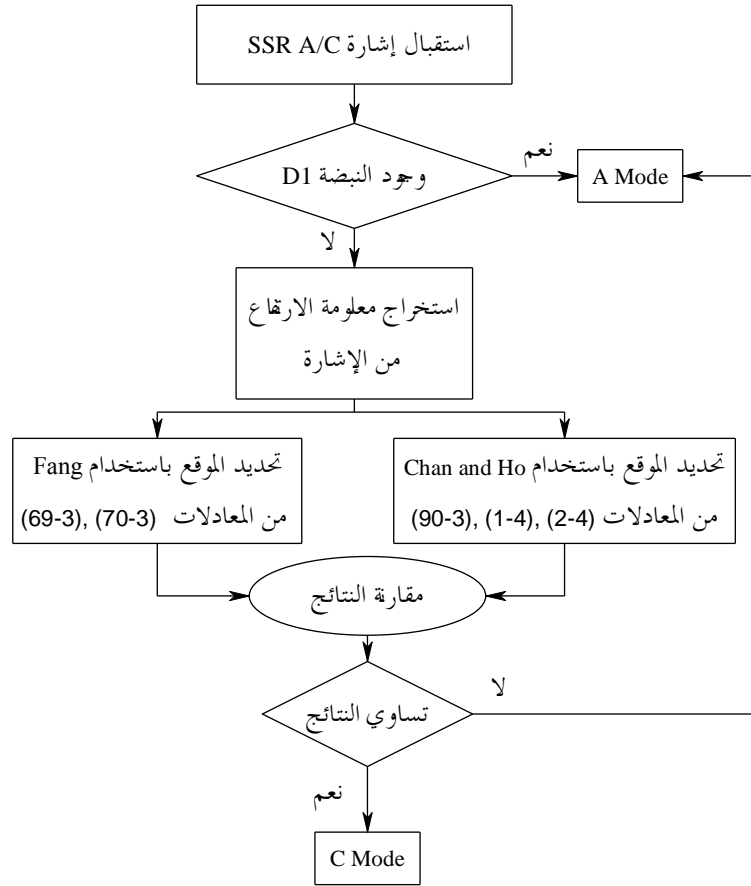
• نقوم بتقدير الموقع باستخدام معادلات Chan and Ho (90-3) و (1-4) و (2-4).

- بمقارنة ناتج الخطوتين السابقتين (الموقع الناتج باستخدام Fang والموقع الناتج باستخدام Chan and Ho). ففي حال تساوي الناتجين فإنّ معلومة الارتفاع التي تم استخدامها في تحديد الموقع صحيحة وبالتالي فالإشارة تابعة للنمط C. أمّا في حال الاختلاف فمعلومة الارتفاع المستخدمة خاطئة والإشارة التي تم استقبالها هي إشارة النمط A.

بذلك يستطيع نظام MLAT من تحديد إشارة التعريف (النمط A) للطائرة والتي تكون ملازمة للطائرة طوال فترة طيرانها. وبالتالي يجري تتبع الطائرة من هذه الإشارة، في حين يمكن معرفة ارتفاع الطائرة من النمط C وتصحيح موقع الهدف عند كل مرة يجري فيها استقبال إشارة النمط C. يجدر الذكر هنا بأنّ وحدة التحكم والملاحة الجوية قد تطلب في بعض الأحيان من طائرة ما أن تغير إشارة تعريفها. وبالتالي عندما يحدث ذلك يمكن إعادة عملية إزالة الالتباس من أجل تحديد نمط التعريف الجديد. يبيّن الشكل 4-22 المخطّط التدفقي لطريقة إزالة الالتباس المقترحة.

➤ مثال عددي لحساب إحداثيات هدف بناءً على الطريقة السابقة

نعتبر وجود هدف يطير على ارتفاع (30700 feet) 9.35736 Km، وموجود في الموقع (120,200) Km. يستخدم الهدف إشارات SSR من مجيب A/C من أجل نمط تعريف 1226 ونمط ارتفاع 1040. تحتوي الإشارة 1226 على التباس حيث من الممكن أنّها قد تكون إحدى إشارات النمط C والتي تشير إلى ارتفاع (93000 feet) 28.3464 Km. نفترض نظام MLAT بثلاث محطات استقبال موجودة في المواقع (0,0)، (0,1)، (1,10). لا يمكن عند استقبال الإشارتين تحديد النمط الذي تنتمي له كل من الإشارتين وذلك أنّ النبضة D1 غير موجودة في كلا الإشارتين. يبين الجدول 4-5 ناتج استخدام الطريقة المقترحة لإزالة الالتباس في كلا الإشارتين.



الشكل 4-22: المخطط التدفقي لطريقة إزالة الالتباس المقترحة.

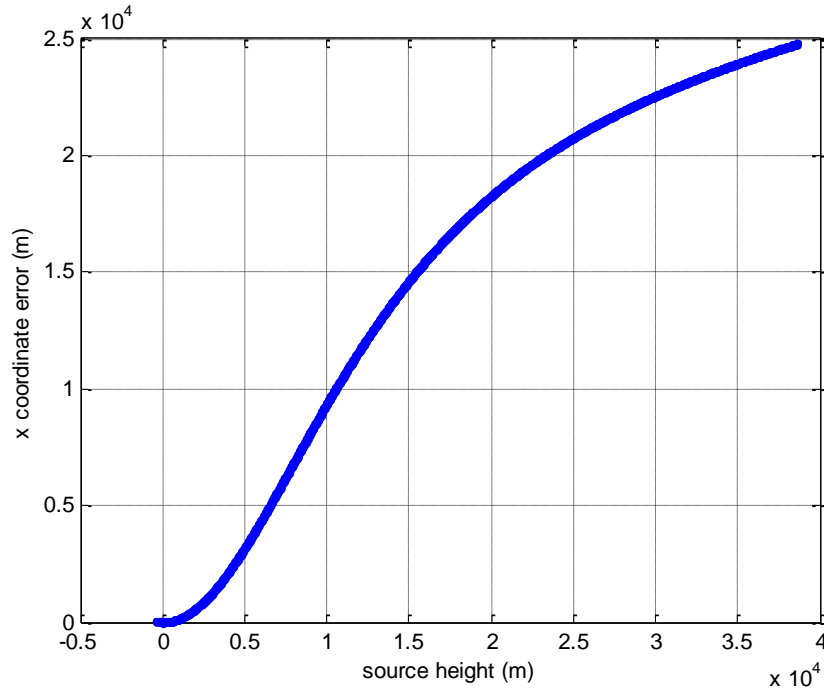
الجدول 4-5: مثال عددي لإزالة الالتباس بالاعتماد على الطريقة المقترحة.

النتيجة	y_{Chan_Fixed} (Km)	x_{Chan_Fixed} (Km)	y_error (Km)	x_error (Km)	y_{Chan} (Km)	x_{Chan} (Km)	y_{Fang} (Km)	x_{Fang} (Km)	الإشارة
نمط C	20	100	6.0232	36.517	13.977	63.483	20	100	1040
نمط A	26.534	141.63	12.558	78.150	13.977	63.483	40.068	221.67	1226

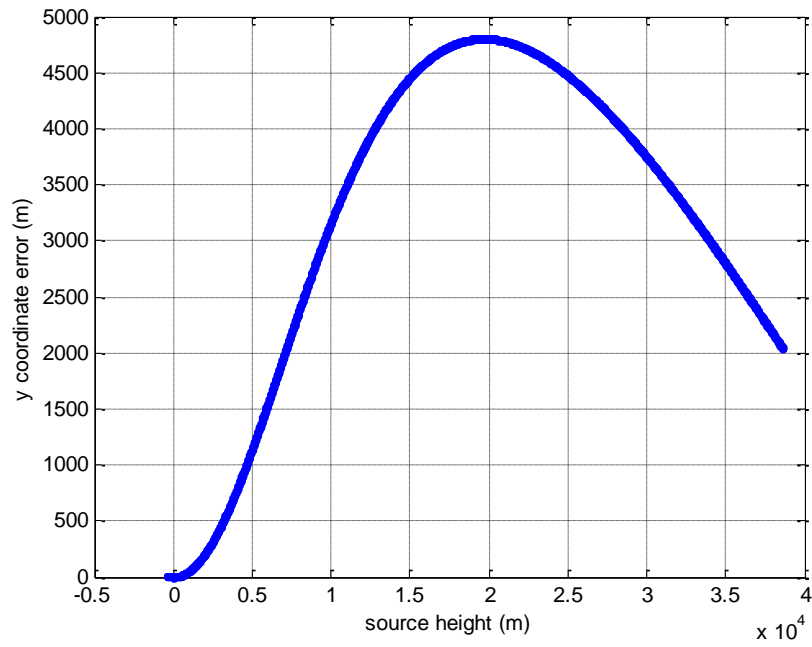
نلاحظ من الجدول أنه عندما تم استخدام معلومة الارتفاع المحتواة في الإشارة 1040 (والتي هي معلومة الارتفاع الصحيحة) نتج لدينا باستخدام إجرائيتين مختلفتين نفس الموقع للهدف، أي أن الإشارة المستقبلية هي فعلاً إشارة النمط C. في حين أن معلومة الارتفاع في الإشارة 1226 لاتعطي ارتفاع الهدف الصحيح وبالتالي نتج خطأ في موقع الهدف المقدر باستخدام كل من Fang و Chan and Ho وبالتالي فإن الإشارة 1226 هي إشارة تعريف وليست إشارة ارتفاع.

➤ مشاكل وحلول

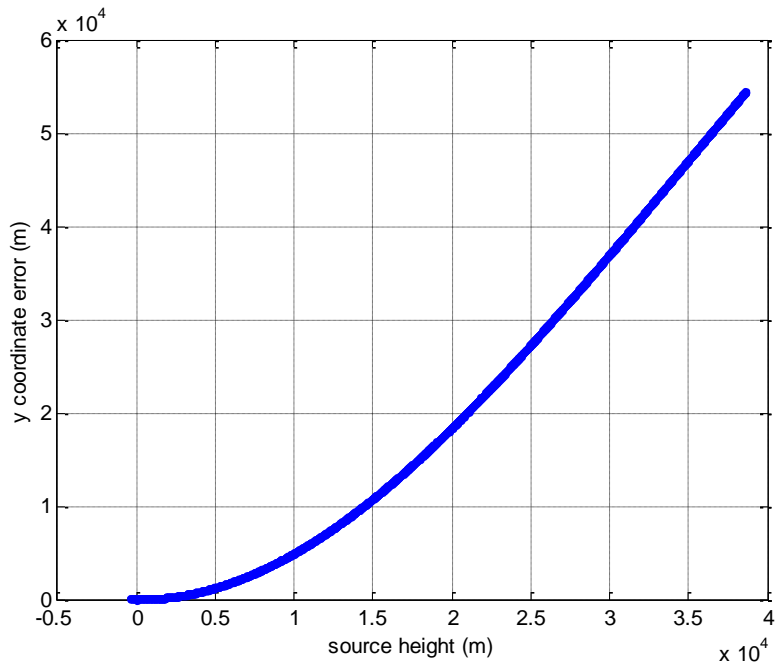
تعاني هذه الطريقة من مشكلة أساسية في إزالة الالتباس وهي أن المتحولين x_error و y_error المعرفان في الشكل 19-4 يعتمدان بشكل أساسي على موقع الهدف، أي أن الخطأ يتغير مع تغيير موقع الهدف. قمنا بإجراء محاكاة لإظهار هذا الخطأ، حيث يبين الشكل 23-4 الخطأ في الإحداثية x لهدف قريب من النظام موجود في (50,25) Km في حين يبين الشكل 24-4 الخطأ في الإحداثية y . في حين تبين الأشكال 25-4، 26-4 الخطأ في الإحداثيات x ، y لهدف بعيد عن النظام موجود في (350,225) Km على الترتيب. نلاحظ من هذه الأشكال أن الخطأ في تقدير الموقع باستخدام إجراءات Chan and Ho يختلف باختلاف موقع الهدف النسبي. وبالتالي فإن الطريقة الأولى لإزالة الالتباس ليست فعالة ولا يمكن الاعتماد عليها دون علم مسبق بموقع الهدف النسبي عن المستقبلات. ومن أجل استخدام هذه الطريقة لإزالة الالتباس يجب على النظام أن يعرف المكان النسبي للهدف مع مستقبلات النظام، وعندها يجري حساب توابع الخطأ x_error و y_error من أجل هذا الموقع وبالتالي إزالة الالتباس بين إشارات النمطين A و C. كما يمكن لتجاوز هذه المسألة دراسة إمكانية الاستفادة من طرق تحديد موقع مختلفة (إجراءات لا تعتمد على TDOA، مثال DOA).



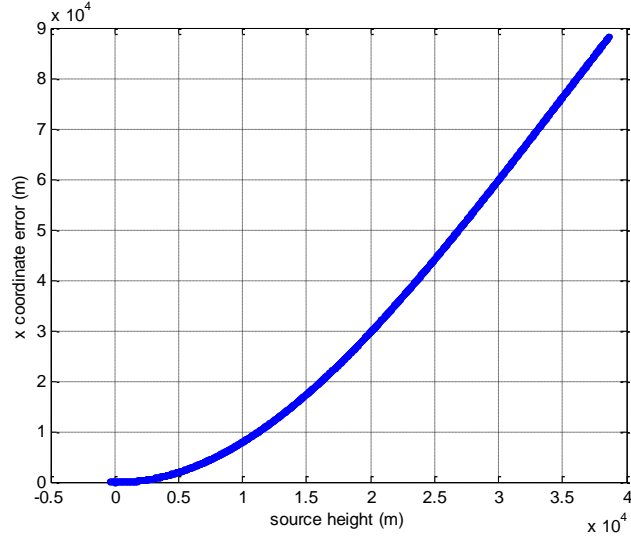
الشكل 23-4: الخطأ في الإحداثية x من أجل هدف يبعد عن النظام (50,25) Km.



الشكل 4-24: الخطأ في الإحداثية y من أجل هدف يبعد عن النظام (25,50) Km.



الشكل 4-25: الخطأ في الإحداثية x من أجل هدف يبعد عن النظام (225,350) Km.



الشكل 4-26: الخطأ في الإحداثية y من أجل هدف يبعد عن النظام (350,225) Km.

3.7.4. الطريقة الثانية المقترحة لإزالة الالتباس

نتيجة للإرسال المستمر من الهدف لإشارات السطح فإنه يمكن الاستفادة من تتابع الإشارات المستقبلية لإزالة الالتباس وذلك يكون بتحديد الموقع باستخدام إحدى الإحداثيات (Fang أو Chan and Ho) للإشارة المستقبلية وتصحيح الموقع باستخدام معلومة الارتفاع من الإشارة المستقبلية. عندما تكون الإشارة المستقبلية من النمط C (إشارة ارتفاع) فإنه من الممكن الحصول على موقع الهدف ثلاثي الأبعاد، عن طريق المعادلات (3-69، 3-70، 3-90) وبما أن إشارة النمط C تحمل معلومة الارتفاع الصحيحة للهدف وبالتالي فإنه بحساب موقع الهدف لعدة إشارات متتالية من النمط C نجد أن موقع الهدف لا يتغير بالشكل الكبير والمواقع الناتجة للإشارة المتكررة متقاربة فيما بينها. في حين إذا كانت الإشارة هي إشارة النمط A (إشارة تعريف) فإن معلومة الارتفاع التي ستستخدم في معادلات تحديد الموقع غير صحيحة وينعكس ذلك على تغيير كبير في موقع الهدف بين كل إشارتين متتابعتين.

➤ مثال عددي لحساب إحداثيات هدف بناءً على الطريقة السابقة

نفترض وجود هدف يطير على ارتفاع (30700 feet) 9.35736 Km، وموجود في الموقع (120,20) Km. يستخدم الهدف إشارات SSR من مجيب A/C من أجل نمط تعريف 1226 ونمط ارتفاع 1040. تحتوي الإشارة 1226 على التباس حيث من الممكن أنها قد تكون إحدى إشارات النمط C والتي تشير إلى ارتفاع (93000 feet) 28.3464 Km.

نفترض نظام MLAT بثلاث محطات استقبال موجودة في المواقع (0,0)، (0,1)، (1,10). لا يمكن عند استقبال الإشارتين تحديد النمط الذي تنتمي له كل من الإشارتين وذلك أن النبضة D1 غير موجودة في كلا الإشارتين. يبين الجدول 4-6 ناتج تحديد الموقع من أجل تتابع للإشارتين 1040 و 1226.

الجدول 4-6: مثال عددي لإزالة الالتباس بالاعتماد على تتابع عدة إشارات.

الإشارة	الموقع x الحقيقي للهدف (Km)	الموقع y الحقيقي للهدف (Km)	x_{Fang} (Km)	y_{Fang} (Km)	الفرق x في (Km)	الفرق y في (Km)
1040	120	20	120	200	0	
1040	120.5	20	120.5	20	0.5	
1226	120	20	339.8	55.9		
1226	120.5	20	341.5	56	0.1	1.7

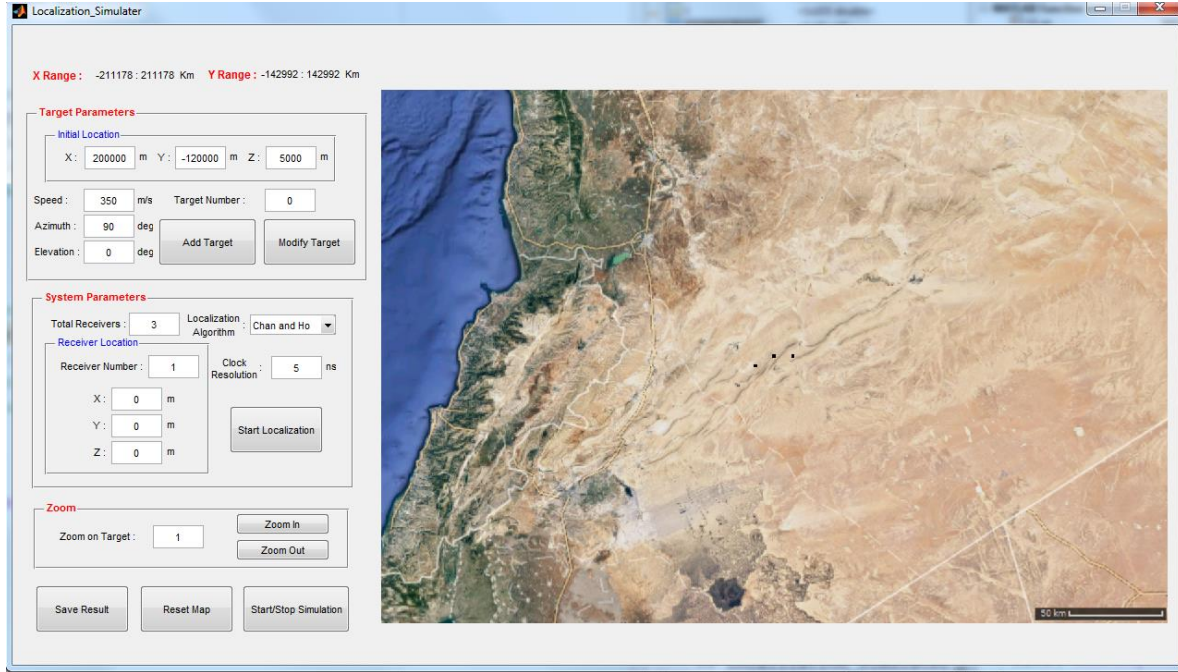
يبيّن الجدول السابق أنّ الخطأ الناتج على موقع الهدف من أجل الإشارة 1226 يعطي خطأ في الموقع حوالي 1.8 Km بالإجمال. في حين أنّ الهدف لم يتحرك سوى 0.5 Km. وبالتالي يمكن القول أن الإشارة تابعة للنمط A. يجب الانتباه هنا إلى أنّه يجب على الزمن الفاصل بين إشارتين لنفس النمط أن يكون صغيراً بحيث يمكن أن نعكس الفرق الناتج في تحديد الموقع على الخطأ في اعتبار الإشارة المستقبلية هي إشارة ارتفاع وليس مسافة قد تحرك بها الهدف فعلاً.

8.3. دراسة أثر دقة ساعة النظام على إجرائية تحديد الموقع

نعلم مما سبق أنّ إجرائيات تحديد الموقع في أنظمة MLAT السلبية تعتمد وبشكل رئيسي على قياسات الفروقات الزمنية للوصول، وبالتالي كلما كانت الفروقات الزمنية أكثر دقة انعكس ذلك على نتيجة أداء إجرائية تحديد الموقع. فيما يلي نجري محاكاة برمجية للأداء من أجل إجرائيات تحديد موقع مختلفة ودقة ساعة نظام مختلفة أيضاً. قمنا بتصميم واجهة تخاطب برمجية باستخدام Matlab لتسهيل عملية محاكاة النظام. يبيّن الشكل 4-27 واجهة التخاطب والتي تحتوي بشكل رئيسي على:

- معاملات الهدف: ويمكن من خلالها إضافة أهداف جوية من موقع ابتدائي يمكن تحديده بالإضافة إلى سرعة الهدف وزاوية السمّت والارتفاع لحركته. ويمكن إضافة عدة أهداف في نفس الوقت. بالإضافة إلى إمكانية تغيير معاملات الهدف ومسار حركته.

- معاملات النظام: نحدّد من خلالها عدد محطات الاستقبال للنظام ومواقعها، بالإضافة إلى المعامل الأهم وهو دقّة ساعة عمل النظام. كما يمكن تحديد إجرائيّة تحديد الموقع لتكون Chan and Ho، Foy، Friedlander، أو Fang.



الشكل 4-27: واجهة التخطاب.

نجري بدايةً مقارنة أداء الإجرائيّات Chan and Ho، Friedlander، و Foy من أجل دقّة ساعة 20 ns (50 MHz). يبيّن الجدول 4-7 متوسط الخطأ في المدى (بعد الهدف عن محطة الاستقبال المركزيّة والمتوضّعة في الموقع (0,0,0)، والانحراف المعياري له من أجل هدف قريب من النظام. في حين يبيّن الجدول 4-8 المتوسط والانحراف المعياري لهدف بعيد عن النظام من أجل نفس الدقّة.

الجدول 4-7: أداء إجرائيّات تحديد الموقع من أجل دقّة ساعة نظام 20 ns لهدف قريب.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائيّة تحديد الموقع
1884	2674	Chan and Ho
1834	2596	Friedlander
1797	1633	Foy

الجدول 4-8: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 20 ns لهدف بعيد.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
1248	1554	Chan and Ho
1188	1644	Friedlander
1250	1598	Foy

نلاحظ من الجدولين السابقين أنّ متوسط الخطأ في المدى الناتج عن الإجراءات الثلاث متقارب ويزداد بازدياد بعد الهدف عن المحطة. كما نلاحظ أنّ أداء الإجرائية التكرارية (Foy) من أجل هدف قريب أفضل بـ 1 Km في حين يتقارب أداء الإجراءات من أجل هدف بعيد.

يمكن بزيادة دقة ساعة النظام الحصول على دقة أكبر في الفروقات الزمنية مما ينعكس على انخفاض في قيمة متوسط الخطأ في المدى لموقع الهدف. تبين الجدول 4-9 و 4-10 أداء الإجراءات من أجل دقة ساعة نظام 10 ns لهدف قريب وهدف بعيد. نلاحظ أنّه من أجل هدف قريب فإنّ متوسط الخطأ انخفض ليصل إلى بضع مئات الأمتار، بالإضافة لكون أداء Foy هي الأفضل.

الجدول 4-9: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 10 ns لهدف قريب وعدد مستقبلات 5.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
187	273	Chan and Ho
285	408	Friedlander
151	238	Foy

الجدول 4-10: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 10 ns لهدف بعيد وعدد مستقبلات 5.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
595	900	Chan and Ho
512	860	Friedlander
564	816	Foy

وأخيراً نجري المحاكاة السابقة للحصول على الأداء من أجل 5 ns لساعة عمل النظام. فنجد في الجدولين التاليين (4-11 و 4-12) زيادة وتحسّن في تحديد الموقع عن الحالتين السابقتين.

الجدول 4-11: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 5 ns لهدف قريب وعدد مستقبلات 5.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
95	148	Chan and Ho
242	281	Friedlander
90	145	Foy

الجدول 4-12: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 5 ns لهدف بعيد وعدد مستقبلات 5.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
280	425	Chan and Ho
277	476	Friedlander
277	423	Foy

نعيد المحاكاة السابقة من أجل نظام MLAT بثلاث محطات استقبال. تبين الجدول 4-13 و 4-14 الأداء من أجل ساعة نظام 5 ns لهدف قريب وهدف بعيد على الترتيب. نجد أن أداء الإجراءات متقارب بشكل كبير. ونلاحظ أن دقة تحديد الموقع تنخفض بشكل كبير وملحوظ كلما ابتعد الهدف عن محطات الاستقبال. وهذا الانخفاض يزداد بشكل كبير مع انخفاض دقة ساعة النظام، وهذا واضح في الجدولين 4-15 و 4-16.

الجدول 4-13: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 5 ns لهدف قريب وعدد مستقبلات 3.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
99	141	Chan and Ho
100	146	Fang
104	145	Foy

الجدول 4-14: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 5 ns لهدف بعيد وعدد مستقبلات 3.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
904	1151	Chan and Ho
804	1140	Fang
855	1112	Foy

الجدول 4-15: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 10 ns لهدف قريب وعدد مستقبلات 3.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
188	273	Chan and Ho
186	281	Fang
192	278	Foy

الجدول 4-16: أداء إجراءات تحديد الموقع من أجل دقة ساعة نظام 10 ns لهدف بعيد وعدد مستقبلات 3.

الانحراف المعياري للخطأ (m)	متوسط الخطأ في المدى (m)	إجرائية تحديد الموقع
1639	2555	Chan and Ho
1615	2357	Fang
1746	2610	Foy

الفصل الخامس

الخاتمة والآفاق المستقبلية

قمنا في هذا العمل بالتعرف على أنظمة السطع الجوي المختلفة، وركزنا في دراستنا على أنظمة متعددة المستقبلات MLAT. حيث أجرينا دراسة نظرية معمقة تناولت أهم خصائص هذا النظام، مبدأ عمله، والتحديات التي يمكن أن تواجه مصممي النظام. تعرفنا من خلال الدراسة على معالم MLAT والعوامل المؤثرة به من الهندسة الجغرافية للنظام، وأخطاء القياس، وإجرائيات تقدير الموقع. وقد أخذنا على عاتقنا دراسة إجرائيات تقدير الموقع من بين هذه العوامل، وذلك أنه لا يمكن لنظام MLAT العمل بدون استخدام إجرائية تقدير للموقع وهي التي تحدّد بفعاليتها الدقة النهائية للنظام. قمنا بعد ذلك بدراسة طرق تقدير الموقع في نظام MLAT بالاعتماد على قياسات TDOA وتعرفنا على مقدرات LS و ML. وعلى ضوء ذلك قمنا بتقسيم إجرائيات تحديد الموقع إلى ثلاثة أقسام وفقاً للنموذج الرياضي الذي يقوم بربط المعالم بالمجاهيل في مسألة تحديد الموقع. وعرضنا المبدأ النظري والرياضي لأهم إجرائيات تحديد الموقع، ورأينا أن بعض الإجرائيات تعمل من أجل نظام MLAT بثلاث مستقبلات فقط (Fang)، حيث لا يمكن لهذه الإجرائيات الاستفادة من المعلومات الإضافية التي يمكن الحصول عليها عند إضافة محطة استقبال أخرى للنظام.

تم دراسة إجرائيتين أخريين تعملان من أجل ثلاث محطات استقبال هما إجرائيتنا Foy و Chan and Ho والتي تمتلك كل منهما القدرة على تقدير الموقع من أجل أكثر من ثلاث محطات استقبال. كما تم دراسة إجرائيتي Friedlander و Bancroft. حيث قمنا بتحديد نقاط قوة وضعف كل منها من حيث التعقيد الحسابي واحتمال نجاحها أو فشلها.

بعد ذلك قمنا بدراسة على قياس CRLB من أجل المقارنة بين أداء الإجرائيات. وقمنا قبل البدء بعملية المقارنة بدراسة أثر تغيير عدد المستقبلات في النظام على معيار CRLB ووجدنا أنه بزيادة عدد المستقبلات فإن قيمة CRLB تصبح أقل وبالتالي يمكن لإجرائية تحديد الموقع الوصول إلى دقة أعلى بزيادة عدد المستقبلات. أجرينا عمليات المقارنة لأداء الإجرائيات وفق معيار CRLB ووجدنا أن منحني Friedlander مزاح على عكس الإجرائيات الأخرى والتي تقترب بمحملها من قيمة CRLB من أجل استطاعة ضجيج منخفضة، حيث أن Chan and Ho و Foy تقترب أيضاً بشكل كبير من CRLB حتى من أجل استطاعة الضجيج المرتفعة. ولاحظنا أن معظم الإجرائيات التي تقوم بتحديد الموقع لنظام بثلاث محطات استقبال لها نفس الأداء تقريباً، كونها تعمل جميعاً على حل المعادلات الرياضية بشكل مباشر. ووجدنا من أجل إجرائية Foy أن عدد التكرارات المطلوبة لتتقارب النتيجة من الموقع الهدف يختلف باختلاف عدد المستقبلات، فكلما كان

عدد المستقبلات أكبر كلما كان عدد التكرارات المطلوب أقل. كما أن القيمة الابتدائية لموقع الهدف تؤثر بشكل كبير على أداء الإجراءات، فالتقارب غير مضمون لهذه الإجراءات. قمنا بعد ذلك بمحاولة تصميم نظام MLAT بثلاث محطات استقبال قادر على تحديد ثلاث أبعاد للهدف، مع العلم أننا درسنا نظرياً أنه لا يمكن لنظام بثلاث محطات أن يحدد أكثر من بعدين للهدف. ومع العلم أن إجراءات Fang قادرة على تحديد ثلاثة أبعاد للهدف عندما يُعلم الارتفاع من مصدر خارجي عن نظام MLAT. بالإضافة إلى معرفة أن الإشارات التي يتعامل معها نظام MLAT تحتوي في مجملها على إشارات تحدد ارتفاع الهدف. فإنه بالإمكان الاستفادة من هذه الإشارات لتصحيح موقع الهدف الناتج وتحديد موقع الهدف بثلاثة أبعاد، فواجهتنا مشكلة الالتباس بين إشارات النمطين A و C في نظام SSR حيث أن لكل منهما نفس بنية إشارة الجواب. اقترحنا طريقتين مختلفتين للتخلص من هذا الالتباس، الأولى تقوم على مبدأ اعتبار الإشارة المستقبلية هي إشارة الارتفاع وتصحيح الموقع بطريقتين مختلفتين، الأولى كما اقترح Fang والثانية قمنا باقتراحها. تقوم طريقة التصحيح الثانية على دراسة أثر تغير ارتفاع الهدف على ناتج إجراءات Chan and Ho والاستفادة من هذه المعلومة في إزالة الالتباس بين إشارات النمطين A و C حيث تقترح هذه الطريقة أن يتم حساب الخطأ الناتج عن زيادة ارتفاع الهدف، وبالتالي عند وصول إشارة لانعلم أي A أم C، نقوم باعتبارها إشارة ارتفاع ونقوم بتصحيح الموقع بعد معرفة الخطأ الناتج عند هذا الارتفاع وبالمقارنة مع ناتج Fang يمكن القول أن معلومة الارتفاع صحيحة إذا تطابقت النتائج وبالتالي الإشارة المستقبلية تابعة لنمط الارتفاع C، بينما إذا اختلفت النتائج فإن الإشارة المستقبلية تابعة للنمط A.

اكتشفنا من خلال الدراسة والبحث أن تابع الخطأ الناتج على إجراءات Chan and Ho تتعلق قيمته بالموقع النسبي للهدف عن النظام وبالتالي فإن هذه الطريقة لا تكون فعالة إلا بحالة واحدة وهي وجود تقدير أولي لموقع الهدف، تماماً كما في إجراءات Foy. ويمكن الحصول على هذا التقدير عن طريق طرق تقدير للموقع مختلفة وتعمل على مبدأ غير TDOA، DOA على سبيل المثال. لذلك قمنا باقتراح طريقة ثانية لإزالة الالتباس وهي أن نقوم بملاحقة الإشارات المتتالية والواردة من الهدف عن طريق تحديد الموقع للهدف باعتبار أن الإشارة المستقبلية هي إشارة نمط الارتفاع C، فإذا لاحظنا أن موقع الهدف يتغير بشكل مقبول (يتعلق بسرعة الهدف والزمن الفاصل بين إشارتين متتاليتين) نقول أن هذه الإشارة هي فعلاً تابعة للنمط C، في حين أنه من أجل إشارات نمط التعريف A. لن نحصل على قيم منطقية للموقع وتختلف بشكل كبير لا يتناسب مع الزمن الفاصل بين استقبالي إشارتين متتاليتين وبالتالي يمكن القول أن هذه الإشارة تابعة للنمط A.

أخيراً قمنا بكتابة برنامج وتصميم واجهة تخاطبية على البيئة البرمجية Matlab من أجل محاكاة أداء نظام MLAT حقيقي وتحديد الخطأ الأصغري الذي لا يمكن تجاوزه عند تصميم النظام عملياً. حيث يرتبط هذا الخطأ بشكل أساسي بدقة ساعة النظام، فكلما زادت دقة ساعة النظام كلما قلت قيمة الخطأ الناتج عن إجرائية تقدير الموقع.

جهزت واجهة التخاطب بخيارات لتغيير معاملات النظام من أجل إجراء محاكاة لنظام MLAT كامل من حيث عدد المستقبلات ومواقعها وتوليد أهداف بمواقع عشوائية والتحكم بمسارها. وقد وجدنا أن الأخطاء الأصغرية التي حصلنا عليها تمثل بشكل أو بآخر الدقة العظمى التي يمكن لنظام حقيقي الوصول إليها من أجل دقة ساعة معينة. وبالتالي يجب عند تصميم النظام عملياً إجراء اختبارات على أداءه ومحاولة الوصول قدر الإمكان في مرحلة الاختبارات إلى القيمة التي حصلنا عليها أثناء الدراسة النظرية.

آفاق مستقبلية

بعد ما قمنا به من توسع واستفاضة في دراسة إجرائيات تحديد الموقع، يقع على عاتقنا، من أجل الوصول إلى تصميم نظام MLAT سلمي، بشكل أساسي دراسة العوامل الأخرى المؤثرة على معامل MLAT وهي أخطاء القياس والهندسة الجغرافية للنظام. فهما معاملان أساسيان لتحديد الدقة العظمى التي يمكن للنظام الوصول إليها. هناك أيضاً إمكانية دراسة أنظمة MLAT محسنة تقوم باستخدام أكثر من طريقة لتحديد موقع الهدف بأن واحد. كما أننا في دراستنا لم نتطرق إلى دراسة إمكانية الحركة لمحطات الاستقبال، وبالتالي يصبح هناك مسألة تحديد موقع المحطات المتحركة قبل تحديد موقع الهدف، ويمكن من أجل ذلك الاستفادة من أنظمة GNSS لتحديد موقع المحطات وبالتالي تصبح مسألة حركة محطات الاستقبال قابلة للتحقيق. إضافة إلى ما سبق ماتزال هناك دراسات وأبحاث عن إجرائيات تقدير موقع جديدة تكون أكثر دقة وبالتالي أكثر تعقيداً.

- [01] João Vaz Pato Teixeira Pinto, “Assessment and Design of Multilateration Telecommunication Systems installed in NAV Portugal, EPE”, Master dissertation, Sep. 2011.
- [02] Mel Rees, “Surveillance Strategy”, ENRI International Workshop on ATM/CNS, March 2009.
- [03] “Multilateration, Executive Reference Guide”, Public Report, ERA Corporation and Creativerge, VA, USA, 2010.
- [04] Ivan A. Mantella Gaviria, “New Strategies To Improve Multilateration Systems in the Air Traffic Control”, Ph.D. dissertation, polytechnic university of Valencia, 2013
- [05] “The ATM Surveillance Strategy for ECAC”, EUROCONTROL, 2008.
- [06] “Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances” Edited by Seyed (Reza) Zekavat and R. Michael Buehrer, IEEE Press, 2012.
- [07] Alan Bensky, “Wireless Positioning Technologies and Applications”, ARTECH HOUSE, INC. 2008.
- [08] “Aeronautical Telecommunications, Vol. 4. Surveillance and Collision Avoidance Systems, 5th edition”, International Civil Aviation Organization. 2014.
- [09] W.H.L. Neven, T.J. Quilter, R. Weedon and R.A. Hogendoorn, “ Wide Area Multilateration”, National Aerospace Laboratory, Report on EATMP TRS 131/04, Version 1.1, 2005.
- [10] Ronnie Beason, “A New Multilateration Optimization Technique For Air Traffic Management And Surveillance”, Ph.D. dissertation, university of Oklahoma, 2007.
- [11] “CRC Calculation for Mode-S Transponders”, EUROCONTROL, 1994.
- [12] Michael C. Stevens, “Secondary Surveillance Radar”, ARTECH HOUSE, 1988.
- [13] Wes Stamper, “Understanding mode S technology”, Defense Electronics, Dec. 2005.
- [14] Xinxin Pei, Zhigang Huang, Yanbo Zhu, Wei Liu, “Research on the Relationship between DOP and the Number of Stations for Multilateration System”, IEEE, 2010.

- [15] Ivan A. Mantilla-Gaviria, Mauro Leonardi, Gaspare Galati, Juan V. Balbastre-Tejedor, "Localization Algorithms for Multilateration (MLAT) Systems in Airport Surface Surveillance".
- [16] Don J. Torrieri, "Statistical Theory of Passive Location Systems". IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, Vol. AES-20, No. 2, pp. 183-198, March 1984.
- [17] Wade H. Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation". IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, Vol. AES-12, No. 2, pp. 187-194, March 1976.
- [18] "Multilateration (MLAT) Concept of use, Edition 1.0", International Civil Aviation Organization, 2007.
- [19] Michael Geyer, Anastasios Daskalakis, "Solving Passive Multilateration Equations Using Bancroft's Algorithm", Digital Avionics Systems Conference, pp. F41/41-F41/48, Bellevue, WA, USA, 1998.
- [20] Stephen Bancroft, "An Algebraic Solution of the GPS Equations", IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, VOL. AES-21, NO. 7, pp. 56-59, March 1976.
- [21] Benjamin Friedlander, "A Passive Localization Algorithm and Its Accuracy Analysis", IEEE journal of oceanic engineering, Vol. OE-12, No. 1, pp. 234-245, Jan. 1987.
- [22] Chan, Y.T., Ho, K.C.: A simple and efficient estimator for hyperbolic location. IEEE Trans. Signal Process, Vol. 42, No 8, pp. 1905-1915, Aug. 1994.
- [23] Bertrand T. Fang, "Simple Solution for Hyperbolic and Related Position Fixes". IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, Vol. 26, No. 5, pp. 748-753, Sep. 1990.
- [24] George A. Mizusawa, "PERFORMANCE OF HYPERBOLIC POSITION LOCATION TECHNIQUES FOR CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS". Master dissertation, Aug. 1996.
- [25] Muhammad Aatique, "EVALUATION OF TDOA TECHNIQUES FOR POSITION LOCATION IN CDMA SYSTEMS". Master dissertation, Sep. 1997.
- [26] Ivan A. Mantilla-Gaviria, Mauro Leonardi, Gaspare Galati, Juan V. Balbastre-Tejedor, "Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance", Springer, Signal, Image and Video Processing, Jan. 2014.

- [27] João Figueiras, Simone Frattasi, “Mobile Positioning and Tracking, From Conventional to Cooperative Techniques”, A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2010.
- [28] Smith, J.O., Abel, J.S. “Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements”. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-35. No 12, pp. 1661–1669, Dec. 1987.
- [29] J. S. Abel and J. O. Smith, “The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, 1987.
- [30] H. C. Schau and A. Z. Robinson, “Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences,” IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-35, pp. 1223-1225, Aug. 1987.
- [31] Jacek Stefański, “Hyperbolic Position Location Estimation in the Multipath Propagation Environment”, Gdansk University of Technology, Poland, 2009.
- [32] Bronk, K., Stefanski, J., “Bad Geometry Effect in TDOA Systems”, Polish Journal of Environmental Studies 16(4B), 11–13, 2007.
- [33] Kenneth W. K. Lui, Frankie K. W. Chan and H. C. So, “Accurate Time Delay Estimation based Passive Localization”, City University of Hong Kong, 2010.
- [34] Sreeram Potluri, “HYPERBOLIC POSITION LOCATION ESTIMATOR WITH TDOAS FROM FOUR STATIONS”, Master dissertation, New Jersey Institute of Technology, Jan 2002.
- [35] Yi Jiang, Qing Hu, and Dongkai Yang, “Analysis of Positioning Error for Two-Dimensional Location System”, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Article ID 163958, Oct. 2013.
- [36] Richard B. Langley, “Dilution of Precision”, University of New Brunswick, GPS World, May 1999.
- [37] N. Levanon, “Lowest GDOP in 2-D scenarios”, IEE Proc.-Radar Sonar Navig., Vol. 147, No. 3, June 2000.