





دانشکده مهندسی برق و ریاضیاتیک
گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

ردیابی هدف زیرآبی فقط با جهت با چند حسگر با استفاده از صافی کالمن بی رد

صادق حیدری فراهانی

استاد راهنما:

دکتر حیدر طوسی‌ان شاندیز

استاد مشاور:

علی ایزدی پور

اردیبهشت ماه ۱۳۹۴

تقدیم به

مادر مهربانم،

پدر بزرگوارم،

برادر و خواهر عزیزم

تقدیر و تشکر:

سپاس خدایی را سزااست که تا صدایش می‌کنم پاسخ می‌گوید اگرچه وقتی او مرا صدا می‌کند، من کاهلی می‌کنم.

سپاس خدایی را سزااست که هرچه از او می‌طلبم عطا می‌کند اگرچه وقتی او درخواستی می‌کند من بخل می‌ورزم .

سپاس خدایی را سزااست که غیر از او را نمی‌خوانم و اگر بخوانم هم پاسخی نمی‌شنوم.

سپاس خدایی را سزااست که به غیر از او دل نمی‌بندم و اگر ببندم هم دلم را می‌شکند و پشتم را خالی می‌کند.

از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ: "

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوaram، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر طوسیان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته دانشکده دانشگاه

صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحت

راهنمایی.....متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .

- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

اهمیت غیر قابل انکار دریاها و اقیانوس ها در کاربردهای تجاری، تفریحی و دفاعی سبب شده تشخیص و ردیابی اجسام موجود در دریاها به عنوان یکی از زمینه های تحقیقاتی مهم، مطرح گردد. نیاز به ارتقا و بهبود دقت، پایداری و اجتناب از ریسک، با ظهور برنامه های کاربردی جدید و با رشد پذیرش ربات های زیرآبی در صنایع نظامی و غیرنظامی گسترش می یابد. یکی از عوامل اصلی، در عملیات زیر آب، توانایی اجرای عملیات طولانی مدت به صورت کاملاً خودکار و بدون نظارت از سوی یک کشتی روی سطح آب می باشد ، که این موضوع ضرورت پژوهش در مورد ردیابی زیر آب را پررنگ تر می کند. در این پایان نامه سیگنال های ساطع شده از هدف با زوایای مختلف توسط چند حسگر دریافت می شوند. بردار اندازه گیری دریافت شده توسط حسگرها، شامل زاویه ورود بین سیگنال آکوستیکی با محور افق می باشد که یک رابطه غیر خطی با بردار حالت دارد. به علت غیرخطی بودن این مدل و با توجه به نویزی بودن داده ها، از صافی کالمن بی رد استفاده می کنیم. در این پایان نامه از نوع خاصی از صافی کالمن بی رد، به نام

صافی کالمن بی رد افزوده استفاده خواهد شد که با صافی کالمن توسعه یافته و کالمن بی رد مقایسه می‌شود. به علت استفاده از چند حسگر، نیاز به ترکیب اطلاعات این حسگرها ضروری می‌باشد. از روش ترکیب اطلاعات کواریانس استفاده می‌کنیم و روش پیشنهادی با این روش مقایسه می‌شود که کارایی روش پیشنهادی در نتایج مشخص می‌باشد. روش پیشنهادی ترکیب اطلاعات با ترکیب دو حسگر با هم مزیت هایی نسبت به روش ترکیب اطلاعات تک حسگر دارد، که می‌توان از بالا رفتن دقت تخمین و کاهش خطای ردیابی نام برد. در انتها با بررسی جایابی حسگرها، سه مدل جایابی برای چهار حسگر پیشنهاد شده، که مدل بیزوی در مسئله مورد بحث دارای مشاهده پذیری بهتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی:

سونار، ردیابی، تخمین موقعیت، صافی کالمن، صافی کالمن بی‌رد، ردیابی با چند حسگر،

فهرست

فصل اول - سیستم های آکوستیکی زیر آب

۱-۱ - مقدمه	۱
۱-۲ - تاریخچه	۲
۱-۳-۱) برخی از شرایط در محیط زیر آب	۳
۱-۳-۲) تغییرات سرعت صوت	۳
۱-۳-۳) اتلاف انرژی صوتی در محیط زیر آب	۳
۱-۳-۴) پدیده شکست	۳
۴-۱) سیستم های آکوستیکی	۴
۴-۱-۱) سیستم های آکوستیکی فعال	۴
۴-۱-۲) سیستم های آکوستیکی غیر فعال	۴

..... ۸	 ۵-۱) روش های پردازش
..... ۱۰	 ۶-۱) نویز در محیط آب
..... ۱۲	 ۱-۶-۱) باند فرکانسی زیر ۱ هرتز (Ultra low Band)
..... ۱۲	 ۱-۶-۲) باند فرکانسی ۱ هرتز تا ۲۰ هرتز (Infrasonic Band)
..... ۱۲	 ۱-۶-۳) باند فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ هرتز (Low Sonic Band)
..... ۱۳	 ۱-۶-۴) باند فرکانسی ۲۰۰ هرتز تا ۵۰۰۰۰ هرتز (High Sonic Band)
..... ۱۳	 ۱-۶-۵) باند فرکانسی بالای ۵۰۰۰۰ هرتز (Ultra Sonic Band)
..... ۱۳	 ۷-۱) مشخصه آکوستیکی متحرک های دریایی
..... ۱۶	 ۸-۱) مشخصه های آکوستیکی کلی متعلق به متحرک های دریایی
..... ۱۷	 شکل ۱-۱- طیف مربوط به محدوده نویزهای آکوستیکی تولید شده توسط متحرکهای دریایی
..... ۱۷	 ۹-۱) خلاصه
..... ۱۸	فصل دوم- تخمین حالت در سیستم های دینامیکی
..... ۱۹	 ۲-۱) مقدمه
..... ۲۰	 ۲-۲) صافی کالمن
..... ۲۱	 ۲-۲-۱) شمای کلی صافی کالمن
..... ۲۳	 ۲-۲-۳) عملکرد صافی کالمن
..... ۲۴	 ۲-۲-۴) صافی کالمن خطی
..... ۲۷	 ۲-۲-۵) الگوریتم تکرار صافی کالمن در یک نگاه
..... ۲۹	 ۲-۳) صافی کالمن توسعه یافته :
..... ۳۵	 ۲-۴) شبیه سازی صافی EKF :
..... ۳۵	 ۲-۴-۱) ردیابی سیگنال سینوسی تصادفی
..... ۳۹	 ۲-۵) صافی کالمن بی رد :
..... ۴۵	 ۲-۶) شبیه سازی صافی کالمن بی رد
..... ۴۵	 ۲-۶-۱) ردگیری سیگنال سینوسی
..... ۴۷	 ۲-۷) صافی کالمن بی رد افزوده
..... ۴۹	 ۲-۷-۱) تبدیل Augmented UT

۸-۲ عوامل کاهش‌دهنده عملکرد ردیابی صافی کالمن

۵۱.....

۹-۲ خلاصه

۵۳.....

فصل سوم – ردیابی اهداف زیر آب

۵۴.....

۱-۳ مقدمه

۵۵.....

۲-۳ وظایف بخش ردیابی

۵۶.....

۱-۲-۳ عدم قطعیت در حرکت هدف.....

۵۶.....

۲-۲-۳ مشخص نبودن منشاء مشاهدات حسگر.....

۵۷.....

۴-۳ ردیابی اهداف زیر آب

۵۸.....

۵-۳ مدل سازی دینامیک حرکت هدف

۵۹.....

۱-۵-۳ بررسی مدل ردگیری هدف در فضای کارترین.....

۵۹.....

۶-۳ ردیابی هدف با استفاده از انعکاس

۶۳.....

فصل چهارم – ترکیب اطلاعات و جایابی حسگرها

۶۹.....

۱-۴

ترکیب

اطلاعات

۷۰.....

۲-۴

ترکیب

داده

های

چندین

سنسور

بر

مبنای

صافی

کالمن

۷۱.....

۳-۴ روش ترکیب اطلاعات با استفاده از کواریانس.....

۷۲.....

۴-۴ ترکیب اطلاعات با ۴ حسگر.....

۷۳.....

۱-۴-۴ روش اول: ترکیب حالت.....

۷۳.....

۲-۴-۴ روش دوم: ترکیب حالت – اندازه گیری.....

۷۴.....

۵-۴ در نظرگرفتن نویز در حسگرها.....

۷۵.....

۶-۴ جایابی حسگرها.....

۷۸.....

۷-۴ مدل اندازه‌گیری فقط زاویه.....

۷۸.....

۸-۴ ماتریس اطلاعات فیشر.....

۷۹.....

حسگرها..... ۸۲

۱۰-۴) شبیه سازی جایابی خطی ۸۴

۱۱-۴) توپولوژی جایابی مربعی..... ۸۷

۱۲-۴) توپولوژی جایابی بیضی..... ۹۰

۱۳-۴) شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب ۹۴

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۱۰۱

۱-۵) نتیجه گیری..... ۱۰۲

۲-۵) پیشنهادات..... ۱۰۳

منابع..... ۱۰۴

فهرست اشکال و جداول

شکل ۱-۱- طیف مربوط به محدوده نویزهای آکوستیکی تولید شده توسط متحرکهای دریایی ۱۸

شکل ۱-۲- شمای کلی صافی کالمن ۲۲

شکل ۲-۲- عملکرد کلی صافی کالمن ۲۴

شکل ۴-۲- تخمین سیگنال سینوسی با استفاده از EKF مرتبه اول ۳۸

شکل ۵-۲- تخمین سیگنال سینوسی با استفاده از EKF مرتبه دوم ۳۸

شکل ۶-۲- مقایسه تبدیل UT با EKF ۴۱

شکل ۶-۲ تخمین سیگنال سینوسی با استفاده UKF

.....۴۶

شکل ۶-۲ تخمین سیگنال سینوسی با استفاده AUKF

.....۴۷

جدول ۱-۲ مقایسه MSE در دو روش UKF و EKF

.....۴۷

شکل ۱-۳ اجزای یک سیستم ردیابی.....۵۸

شکل ۲-۳ موقعیت هدف و حسگر در فضای سه بعدی و زوایای آن

.....۶۱

شکل ۳-۳ ساختار هندسی انعکاس کف و سطح.....۶۵

شکل ۱-۴ ترکیب بردار حالت.....۷۱

شکل ۲-۴ ترکیب مقادیر اندازه گیری.....۷۲

شکل ۳-۴ ترکیب اطلاعات با صافی کالمن.....۷۴

شکل ۴-۴ ردیابی هدف با زیرردیابی به وسیله چهار حسگر.....۷۶

شکل ۵-۴ مثالی از هم ارزی جایابی.....۸۱

شکل ۶-۴ جایابی خطی حسگرها.....۸۲

شکل ۷-۴ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت اول.....۸۵

شکل ۸-۴ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت دوم.....۸۵

شکل ۹-۴ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت سوم.....۸۶

جدول ۱-۴ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جایابی خطی.....۸۶

شکل ۱۰-۴ جایابی مربعی با چهار حسگر.....۸۷

شکل ۱۱-۴ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت اول.....۸۸

شکل ۱۲-۴ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت دوم.....۸۸

- شکل ۴-۱۳ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت سوم..... ۸۹
- جدول ۴-۲ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جاییابی مربعی..... ۸۹
- شکل ۴-۱۴ ردیابی بیضوی با چهار حسگر..... ۹۰
- شکل ۴-۱۵ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جاییابی بیضی - حالت اول..... ۹۰
- شکل ۴-۱۶ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جاییابی بیضی - حالت دوم..... ۹۰
- شکل ۴-۱۷ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جاییابی بیضی - حالت سوم..... ۹۲
- جدول ۴-۳ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جاییابی بیضوی..... ۹۲
- شکل ۴-۱۸ مقدار تخمین X_1 ۹۵
- شکل ۴-۱۹ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_1 ۹۵
- شکل ۴-۲۰ مقدار تخمین X_2 ۹۶
- شکل ۴-۲۱ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_2 ۹۶
- شکل ۴-۲۲ مقدار تخمین X_3 ۹۶
- شکل ۴-۲۳ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_3 ۹۷
- شکل ۴-۲۴ مقدار تخمین X_4 ۹۷
- شکل ۴-۲۵ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_4 ۹۷
- شکل ۴-۲۶ مقدار تخمین X_5 ۹۸
- شکل ۴-۲۷ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_5 ۹۸
- شکل ۴-۲۸ مقدار تخمین X_6 ۹۸

شکل ۴-۲۹ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_6 ۹۹

شکل ۴-۳۰ مقایسه ردیابی یک هدف با دو حسگر با استفاده از صافی EKF و UKf و AUKF ۹۹

جدول ۴-۴ مقایسه خطای میانگین مربعات سه صافی EKF, UKF, AUKF در ردیابی هدف ۱۰۰

فصل اول

سیستم های آکوستیکی زیر آب

۱-۱- مقدمه

دنبال کردن هدف، یکی از بخش‌های عمده، در سیستم‌هایی نظیر: سیستم‌های نظارتی، سیستم‌های راهنما و هدایت کننده، ردیابی و سیستم‌های جلوگیری از برخورد کردن به موانع در آب یا فضا می باشد. دنبال کردن هدف به معنی پیش‌بینی کردن وضعیت هدف مانند مکان، شتاب، شکل سه بعدی از هدف یا هر نوع اطلاعات دیگر در طول زمان یا مکان با در نظر گرفتن مشاهدات نویزی می باشد.

ورودی الگوریتم‌های ردیابی توسط حسگرها مانند سونار^۱، رادار یا تصاویر ویدئویی تامین می شود. با توجه به اینکه بحث مورد نظر مربوط به ردیابی در سیستم‌هایی زیرآبی می باشد. ما در این فصل به انواع سونار و چگونگی کارکرد آن می‌پردازیم. سونار به معنی سیستمی است که در آن از انرژی انتشار یافته یا منعکس شده (به صورت امواج آکوستیکی) در زیرآب به منظور آشکار ساختن اهداف و اجسام از راه دور، تعیین فاصله، جهت و موقعیت آنها، ردیابی، ارتباطات و... استفاده می‌گردد.

در یک تقسیم بندی سونارها، شامل دو نوع می‌باشند که عبارت اند از: الف) سونارهای فعال^۲ و ب) سونارهای غیر فعال^۳.

در سونارهای فعال برای آشکارسازی و ردیابی اهداف از ارسال امواج، بازگشت انعکاس از هدف و آشکارسازی انجام می‌شود، ولی در سونارهای غیرفعال تنها از بررسی و تحلیل امواج ساطع شده از اهداف زیرآب برای ردیابی استفاده می‌گردد.

مسائل ردیابی از نظر تعداد اهداف و مشاهدات دریافت شده در هر لحظه به دسته‌های زیر تقسیم می‌گردند:

^۱ Sonar

^۲ Active Sonar

^۳ Passive Sonar

- تک هدف و تک حسگر
- تک هدف و چند حسگر
- چند هدف و چند حسگر

در حالت اول تنها یک هدف وجود دارد و در هر لحظه تنها یک مشاهده که مربوط به آن هدف می باشد دریافت می گردد. در حالت دوم دنبال کردن یک هدف مورد نظر می باشد. اما در هر لحظه چندین مشاهده دریافت می شود که این مشاهدات ممکن است مربوط به اهداف دیگر یا مشاهدات کاذب باشند. بنابراین در اینجا نیاز است که مشاهدات مربوط به هدف مورد نظر از بین مشاهدات دریافت شده مشخص گردد. اما حالت سوم حالتی است که در هر لحظه چندین هدف و چندین مشاهده شامل مشاهدات کاذب وجود داشته باشد. ما در اینجا فرض را بر هر حالت دوم قرار داده و تمامی فرضیات ما بر اساس ردگیری تک هدف با چند حسگر^۴ می باشد.

⁴ Sensor

۱-۲- تاریخچه

تحقیق و تفحص در زمینه آکوستیک زیر آب ، به ابتدای قرن بیستم برمی گردد. هرچند بشر به بعضی از مشخصه ها و خصوصیات محیط زیر آب از زمان های بسیار قدیم پی برده بود، ولی تحقیقات علمی و اصولی در این زمینه از دهه دوم قرن بیستم آغاز و در دوران جنگ جهانی دوم شتاب قابل ملاحظه ای گرفت بگونه ای که دستاوردهای علمی این دوران سال های سال پس از پایان جنگ جهانی منتشر شد. اکنون نیز بسیاری از پژوهش هایی که در این زمینه انجام می شود جنبه کاملاً سری و نظامی داشته و نتایج آن احتمالاً تا ده ها سال بعد جزو اسرار نظامی باقی خواهد ماند. هر چند تحقیقات در زمینه آکوستیک زیر آب استفاده صلح آمیز و بشر دوستانه بسیار فراوانی داشته و دارد ولی طبق آنچه تاریخ نشان داده است ، نتیجه پژوهش های این زمینه ابتدا در زمینه های نظامی مورد اندیشه واقع شده و پس از بهره برداری های کافی در خدمت کاربردهای صلح آمیز قرار گرفته است.

یکی از موفق ترین زمینه های کاربردی آکوستیک زیر آب ، آشکارسازی^۵ و کشف محل و تخمین مسیر حرکت اندازه گیری سرعت متحرک های روی آب یا زیر آب است. دستگاهی که بدین منظور ساخته شده است معمولاً بنام سونار نامیده می شود که با دریافت سیگنال های آکوستیک موجود در محیط بطریقی آن ها را پردازش کرده و وجود یک سیگنال با معنی را که احتمالاً متعلق به یک متحرک دریایی است ، تشخیص داده و از آن مشخصاتی مثل نوع ، سرعت ، جهت و مسیر حرکت را تخمین بزنند.[۱]

در این فصل مقدمه ای اجمالی از سیگنال های آکوستیک زیر آبی ، انواع سونار ، معادلات مربوط به ردیابی زیر آب ارائه خواهیم کرد. تا کنون در دنیا تحقیقات دامنه دار و متعددی در این زمینه صورت گرفته است و همگی بقدر کافی و مشروح مسائل محیط زیر آب و سیگنال های را مورد مطالعه قرار داده اند ، نیازی به بیان تفصیل

⁵ Detection

این مسائل نمی بینیم و در بسیاری موارد با ذکر یک تعریف یا اشاره اجمالی به یک اصطلاح یا واژه خاص بسنده می کنیم. علاقه مندان می توانند برای تحقیق بیشتر در این مورد از مراجع [۱،۲] استفاده نمایند.

۱-۳-۱) برخی از شرایط در محیط زیر آب

۱-۳-۱) تغییرات سرعت صوت

تغییرات سرعت صوت در زیر آب دارای فرمول پیچیده ای است ولیکن با توجه به اهمیت چند پارامتر خاص مثل عمق، شوری و فشار این تغییرات با رابطه (۱-۱) تقریب زده می شود. در این فرمول C سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه، T دمای آب بر حسب درجه سانی گراد، S شوری آب بر حسب یک در هزار و Z عمق آب بر حسب متر است. [۲]

$$C = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.017Z \quad (1-1)$$

۱-۳-۲) اتلاف انرژی صوتی در محیط زیر آب

در شرایط ایده آل فقط دو عامل سبب کاهش انرژی سیگنال آکوستیک زیر آب می شود و این دو عامل عبارتند از: واگرایی^۶ و جذب. واگرایی که با رابطه (۱-۲) فرموله می شود، بیان می کند که هرچه از منبع مولد سیگنال آکوستیک دور شویم انرژی سیگنال کاهش می یابد. رابطه (۱-۲) که با فرض کروی بودن موج بدست آمده است، معادله ای غیرخطی است که در آن K ثابت جذب محیط (بر حسب نپر بر متر) و P_1 و P_2 فشار شعاع صوتی (انرژی صوت) در فواصل متناظر با r_1 و r_2 از مولد آن می باشد:

⁶ Divergence

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cdot e^{-k \cdot (r_2 - r_1)} \quad (2-1)$$

معمولا کاهش انرژی صوتی بر حسب دسی بل بیان شده و آن را با H نشان می دهند و آن کاهش انرژی صوتی را وقتی سیگنال از r_1 به r_2 برسد ، نشان می دهد.[۱]

$$H = 20 \cdot \log_{10} P_1 - 20 \cdot \log_{10} P_2 = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1}\right) + k \cdot (r_2 - r_1) \quad (3-1)$$

a ثابت جذب و برابر ۸٫۷ ، تابعی از دما و فرکانس موج است. محیط زیر آب یک محیط پایین گذر (از نظر فرکانس) است یعنی هرچه فرکانس موج آکوستیک تولید شده بیشتر شود انرژی سیگنال برای رسیدن از فاصله r_1 به r_2 بیشتر کاهش می باید. بعنوان مثال یک سیگنال با فرکانس ۳۰ کیلوهرتز در هر ۳۰ سانتی متر ۱ دسی بل تضعیف می شود. سیگنال هایی که در محدوده فرکانس های اشعه ۷ قرار دارند در هر ۱/۵ سانتی متر یک دسی بل تضعیف خواهند شد. به دلیل تضعیف بسیار شدیدی که در محدوده های فرکانس های رادیویی در آب بر سیگنال تحمیل می شود ، استفاده از این امواج در محیط زیر آب کاربرد چندانی ندارد.

۱-۳-۳ پدیده شکست

پدیده شکست^۷ در محیط آب ، حالت مشابهی با شکست نور دارد ، یعنی این سیگنال برای عبور از یک محیط به محیط دیگر شکسته و از مسیر حقیقی خود منحرف می شود. میزان انحراف را عواملی تعیین می کند که مهمترین آن دماست. از آنجاییکه در محیط زیر آب دمای لایه های آب بتدریج تغییر می کند بنابراین مسیر حرکت یک اشعه باریک صوتی بر اثر پدیده ی شکست بصورت یک منحنی خواهد بود.

⁷ Refraction

۱-۴) سیستم های آکوستیکی

۱-۴-۱) سیستم های آکوستیکی فعال

در سیستم های آکوستیکی فعال ، یک سیگنال خاص با مشخصات معین و ویژه درون آب منتشر می شود. سپس سیستم مترصد بازآوایش^۸ این سیگنال می شود و به این منظور سیگنال های محیط را دریافت و پردازش می کند. اصول کار مبتنی بر این واقعیت است که اگر پرتوهای سیگنال آکوستیکی ارسال شده در مسیر حرکت خود به مانعی برخورد منعکس شده و اگر انرژی برگشت کافی داشته باشند، به منبع مولد خود باز می گردند. سیستم آکوستیکی با دریافت این سیگنال و تعیین پارامترهایی مثل زمان رفت و برگشت و تغییر فرکانس سیگنال دریافتی نسبت به سیگنال ارسالی ، مشخصات هدف دریایی را تعیین می کند این نوع سیستم ها باید انرژی مورد نیاز برای ارسال یک سیگنال پر قدرت آکوستیکی را تامین نماید ، بنابراین سیستم های آکوستیکی فعال همیشه مشکل توان مصرفی دارند ولی در عوض چون پارامترهای سیگنال ارسالی از قبل مشخص است ، بنابراین روش های پردازشی جهت کشف و آشکارسازی سیگنال بازتاب شده ، بسیار ساده تر خواهد بود. در کاربردهای نظامی سیستم های آکوستیکی فعال باید به گونه ای طراحی شوند که نتوان به راحتی حضور آن ها را در محیط کشف کرد ، به همین دلیل تاکید بیشتری بر سیستم های آکوستیکی غیر فعال وجود دارد. در سیستم های جاسوس زیر آب معمولاً سیستم های فعال حضوری ندارند.[۱]

۱-۴-۲) سیستم های آکوستیکی غیر فعال

در سیستم های آکوستیکی غیر فعال ، سیستم فقط به سیگنال های موجود در محیط گوش داده آن ها را پردازش می کند. این سیگنال ها صرفنظر از نویز محیطی می توانند شامل سیگنال های با معنی هم باشند که از

⁸ reverberation

متحرک های دریایی در محیط انتشار یافته اند. ادعا می شود که در سیستم های آکوستیکی غیر فعال امکان کشف اهداف دورتر نسبت به سیستم های فعال بیشتر است. این موضوع به دلیل آن است که اولاً تلفات انرژی نسبت به حالتی که خود هدف مولد سیگنال صوتی است دو برابر خواهد بود چون این تلفات⁹ مربوط به مسیر رفت و برگشت سیگنال می باشد. ثانیاً یک سیستم آکوستیکی فعال براحتی نمی تواند یک سیگنال پر انرژی مثل سیگنالی که از چرخش پره های یک کشتی حاصل می شود، تولید کند.

در سیستم های آکوستیکی غیرفعال، روش های کشف و آشکار سازی سیگنال های با معنی محیط و تشخیص آنها از نویز بسیار مشکل و پیچیده تر از سیستم های آکوستیکی فعال است. این موضوع از آنجایی ناشی می شود که سیستم چشم امید به دریافت سیگنال هایی دوخته است که از ماهیت آنها اطلاعات چندانی ندارد. [۱]

از جمله سیستم های آکوستیکی که در هر دو نوع فعال و غیرفعال طراحی و ساخته شده اند می توان به سونار اشاره کرد. سیستم های سونار به طور کل در زمینه آشکارسازی محل، تعیین مسیر و دسته بندی نوع اهداف زیر آب یا روی آب کاربرد دارند. از دیگر سیستم های آکوستیکی فعال زیر آب با کاربرد غیر نظامی "ماهی یاب ها" هستند. این دستگاه ها می توانند محل تجمع ماهی ها را در دریا یا اقیانوس مشخص کرده و کشتی های ماهیگیری را برای صید راهنمایی کنند. اکوساندر نیز از جمله سیستم های آکوستیکی غیرفعال است که می تواند نقشه ناهمواری های سطح دریا یا اقیانوس را ترسیم نماید.

۱-۵) روش های پردازش

در سیستم هایی که با پردازش سیگنال آکوستیک زیر آب سروکار دارند معمولاً سیگنال محیط توسط گیرنده ای که هیدروفون نام دارد، دریافت و تبدیل به سیگنالی الکتریکی می شود. این سیگنال می تواند به طریقه آنالوگ یا دیجیتال پردازش شود. در سیستم های قدیمی این سیگنال به صورت آنالوگ و توسط عنصری مانند خازن،

⁹ Losses

ترانزیستور ، تقویت کننده های عملیاتی و المان هایی از این قبیل تحلیل می شد ، ولی چون شرایط و مدل کانال زیرآب صلب و بدون تغییر است و حتی با فرض تغییر ناپذیر بودن این مدل بسیار پیچیده است. که روش های پردازشی معمولی که توسط صافی یا چند عنصر آنالوگ دیگر انجام می شود کاربرد خاص و تک منظوره داشته و با تغییر شرایط محیط ، کارایی خود را از دست می دهند. بنابراین در خصوص پردازش این نوع سیگنال ها نیاز به روش های الگوریتمی و قابل انعطاف است که این کار قطعا از عهده دستگاه های آنالوگ خارج است و طراحی را به سمت روش های کامپیوتری و سیستم های دیجیتال هدایت می کند.

در این پروژه روش هایی را معرفی خواهیم کرد که بیشترین کارایی را داشته باشند و در چند سال اخیر مورد تحقیق و پژوهش بوده است. هرچند ما در اینجا سعی داریم حداقل درگیری را با مسائل و مشکلات محیط زیرآب و سیستم های آکوستیکی زیر آب داشته باشیم و خود را فقط موظف به پردازش سیگنال دریافت شده نهایی در سیستم بدانیم ولی برای آگاهی عمل پردازش ، کشف و شناسایی بدون علم و دانستن این نکات امکان پذیر نخواهد بود :

اول آنکه باید به گونه ای مدل نوین پوشاننده سیگنال را شناسایی کرد. دوم ضریب کیفی دستگاه گیرنده (هیدروفن^{۱۰}) و مشخصات سیستم مشخص باشد و سوم آنکه مشخصات کانال انتقال در زیرآب تعیین و توصیف شده باشند.[۳]

در بخش آتی بطور مختصر به ماهیت و منابع نویز در زیر آب می پردازیم.

¹⁰ hydrophone

۱-۶) نویز در محیط آب

در طراحی هر سیستم پردازش سیگنال ، نویز محیط بعنوان یک عامل مزاحم و اجتناب ناپذیر همیشه حضور دارد و با حضور این عامل اختلال ، کارایی و بازده سیستم محدود و مشروط می شود. در بعضی از سیستم ها پیچیده ترین و پرهزینه ترین قسمت ها فقط به خاطر کاهش تاثیرات نویز یا حذف آن طراحی شده اند. به عنوان مثال کل عملیاتی که در فرایند آشکار سازی سیگنال انجام می گیرد به خاطر حضور نویز است ، چرا که اگر نویز در کار نبود هر سیگنالی که توسط دستگاه گیرنده اخذ می شد را می توانستیم بعنوان یک سیگنال با معنی فرض کرده و هیچ نیازی به عملیات نسبتا پیچیده آشکارسازی نداشتیم. کارایی و بازده یک روش پردازشی هنگامی مورد قبول قرار می گیرد که آن روش بتواند تمام محدودیت هایی را که مسئله نویز به آن ها تحمیل می کند، مورد توجه داشته باشد و به گونه ای بر این مشکلات و محدودیت ها فائق آید.

ماهیت نویز بسیار پیچیده تر از آن است که بتوان مدل قطعی برای آن برگزید و یا گذشته و آینده آن را به صراحت تعیین کرد ولیکن اگر بتوان منابع مولد نویز را شناسایی کرده و مدلی قراردادی برای آن وضع کرد ، می توان در چارچوب این مدل اثرات ناشی از نویز را کاهش داده و طراحی سیستم را به سمتی سوق داد که سرکشی نویز محیطی ، کمترین اختلال را در عملکرد آن سیستم داشته باشد.

در اغلب روش های گوناگون آشکارسازی سیگنال های زیرآب ، نویز محیطی با یک فرض ثابت ، نویز سفید گوسی یا میانگین صفر در نظر گرفته می شود و این فرضیه اگرچه یک مدل با قطعیت^{۱۱} و جزمیت صد درصد نیست ولی با تکیه به آن می توان سیستمی طراحی کرد که تا حد امکان تاثیر نویز را کم نماید (هرچند حذف نویز عملا امکان پذیر نیست).

¹¹ uncertainty

در محیط زیرآب منابع مولد نویز به دو دسته تقسیم می شوند : الف) **مولدهای طبیعی** مثل باد ، زمین لرزه های دائمی بستر دریا ، بعضی جانوران دریایی و فعالیت های مولکولی و حرارتی ب) **مولدهای ساخت بشر** مثل حرکت کشتی ها ، انفجارهای عمدی در بستر دریا ، حفاری .

نویز ناشی از عوامل طبیعی و مصنوعی ماهیتی دائمی ولی تغییر پذیر با زمان ، مکان و شرایط محیط دارند. دائمی و پرنرزی ترین نویز مصنوعی مربوط به سر و صدای کشتی هایی است که دائما در محیط رفت و آمد دارند. سیگنال هایی که در یک محیط پرتوافیک کشتی رانی تولید می شود تا صدها یا حتی هزاران کیلومتر طی مسیر می کنند. این سیگنال ها در محدوده بالای صد کیلومتر واقعا به صورت توی محیطی ظاهر می شوند. از این نویز که مهمترین نویز مصنوعی است بعنوان " نویز کشتیرانی دور فاصله " یاد می شود. بهترین مثال برای تجسم این نوع از نویز ، صدای مزاحم و آزاردهنده ای است که در یک آپارتمان واقع در چند صدمتری یک بزرگراه پرتوافیک بطور دائمی به گوش میرسد.

همانگونه که اشاره شد نویز چه از نوع طبیعی چه مصنوعی شدیداً وابسته به مکان ، زمان ، شرایط محیطی مثل دما و شوری آب هستند . معمولاً سعی می شود حوزه فرکانسی بین صفر تا چند ده کیلوهرتز به تعداد باند تقسیم می شود. به طور مختصر و مجمل باندهای فرکانسی و عوامل موثر هر باند را ارائه می کنیم. [۴]

۱-۶-۱) باند فرکانسی زیر ۱ هرتز (Ultra low Band)

از آزمایش هایی که برای مشخص کردن خصوصیات طیفی این باند انجام شده بر می آید که عوامل مهم مولد نویز در این باند لرزه های بستر دریا و تلاطم لایه های آب بر اثر وزش باد است که تقریباً بطور دائمی ولی با شدت و ضعف متغیر در محیط وجود دارد. البته این باند فرکانسی در طراحی سیستم های آشکارسازی زیرآب چندان مورد توجه نیست.

۱-۶-۲) باند فرکانسی ۱ هرتز تا ۲۰ هرتز (Infrasonic Band)

در محدوده یک تا پنج هرتز از این باند طیف فرکانسی شیب ۵- دسی بل بر اکتاو داشته ولی در محدوده ۵ هرتز به بالا این شیب عکس شده (یعنی ۵+ دسی بل بر اکتاو) و نشان می دهد که عامل جدید ، نویز پر انرژی در این محدوده تولید می کند. این نویز که حاصل از تردد کشتی هاست در این باند شدت می گیرد. این نویز را چنانچه اشاره کردیم نویز " ترافیک کشتیرانی دور فاصله " می نامند. بنابراین اگر آزمایشات در این باند فرکانسی و در یک دریاچه فاقد کشتیرانی و کم عمق انجام شود در اینصورت نویز حاصل از ترافیک کشتیرانی موجود نیست و بالطبع طیف فرکانسی با همان شیب ۵- دسی بل بر اکتاو کاهش یافته و به صفر می رسد. بنابراین تنها عامل در این باند در چنین شرایطی باد خواهد بود .

۱-۶-۳) باند فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ هرتز (Low Sonic Band)

در این باند فرکانسی که یکی از مورد توجه ترین باندهای فرکانس پایین برای سونارهای غیرفعال است ، عامل موثر در ایجاد نویز ، کشتیرانی است. در این باند از حدود ۳۰ هرتز نمودار طیف توان نویز یک حالت ماکزیمم پیدا کرده که تا حدود ۱۰۰ هرتز ادامه پیدا دارد. سپس از صد هرتز به بعد شروع به کاهش میگذارد. در این باند نیز ترافیک متغیر کشتیرانی بر روی شدت و ضعف نویز تاثیر میگذارد.

۱-۶-۴) باند فرکانسی ۲۰۰ هرتز تا ۵۰۰۰۰ هرتز (High Sonic Band)

در این باند فرکانسی که عامل مولد نویز ، باد است. به ازای دو برابر شدن سرعت باد ، طیف توان نویز ۵ دسی بل تقویت می شود. نویز این باند که وابسته به باد است در فرکانس حدود ۵۰۰ هرتز دارای ماکزیمم است و در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز به بعد با شیب ۵- تا ۶- دسی بل بر اکتاو کاهش می یابد. به خاطر آنکه در محیط آب هرچه فرکانس بالاتر برود مسئله جذب باعث تضعیف بیشتر سیگنال می شود به همین خاطر نویز این باند برد چندان وسیعی ندارد و سریع در محیط میرا خواهد شد.

۱-۶-۵) باند فرکانسی بالای ۵۰۰۰۰ هرتز (Ultra Sonic Band)

در محدوده ۵۰k تا ۲۰۰k هرتز عواملی مثل نویز حرارتی و نویزهای مولکولی موثرند. در این باند نمودار طیف با شیب ۶+ دسی بل بر اکتاو افزایش دارد و در ضمن نویز در این باند تقریباً در سراسر محیط دریا یا اقیانوس یکنواخت است. بعضی از جانوران دریایی از خود سیگنال هایی را در این باند تولید می کنند.

مطالبی که در این قسمت مطرح شد مطالبی مقدماتی در زمینه منابع مولد نویز است که فقط مفاهیم ذهنی و استدلالی موضوع نویز را در محیط زیرآب مشخص می کند. مسئله نویز به طور جداگانه مورد تحقیق و تفحص دانشمندان و محققان آکوستیک زیر آب بوده است و بخودی خود کتاب ها و مقالات مفصلی را می طلبد.

۱-۷) مشخصه آکوستیکی متحرک های دریایی

قبلاً به این موضوع اشاراتی داشتیم که سیستم های آکوستیکی زیر آب به دو دسته فعال و غیر فعال دسته بندی می شوند. سیستم های غیر فعال موظفند به سیگنال های محیطی گوش فرا داده و در صورت حضور مولفه های با معنی در محیط ، آن ها را کشف نمایند. بنابراین روش های پردازشی جهت کشف و آشکارسازی در مورد سیستم های غیرفعال با اهمیت تر و مشکل سازتر است. در این مبحث هدف آن است که بررسی کنیم چه مشخصه های آکوستیکی خاص برای اشیای دریایی مثل کشتی ، زیردریایی و دیگر وسایل می توان برگزید

تا سیستم غیر فعال قادر به شناسایی آن ها باشد. به عبارت دیگر باید مشخص کنیم که هر متحرک دریایی چگونه امواجی از خود ، در محیط منتشر می کند که سیستم آکوستیکی با استناد به آن ها قادر به کشف وجود متحرک می شود. امروزه کشتی ها و زیردریایی هایی که بیش از سی متر طول دارند معمولا از طریق یک سیستم مکانیکی در آب حرکت می کنند که این سیستم مکانیکی شامل پروانه گردنده کشتی نیز می باشد. قسمت کمی از انرژی عظیمی که صرف حرکت متحرک در آب می شود، به صورت امواج آکوستیکی در آب منتشر می گردد. منبع انتشار این امواج به چند دسته زیر تقسیم می شوند:[۴]

- قسمت های مولد نیروی محرکه متحرک دریایی (موتور ، چرخ دنده ها ، حرکت پیستون موتور ، و سیستم احتراقی سیلندرها)
- پروانه گردنده متحرک دریایی
- ماشین های جانبی متحرک دریایی (ژنراتورهای برق – سیستم تحویه ، پمپ ها و ...)
- تاثیرات هیدرو دینامیکی

طیف چگالی توان امواج آکوستیکی منتشر شده در محیط شامل پهنای وسیعی از هارمونیها در حوزه فرکانس است به اضافه آنکه در این طیف مولفه های باند باریکی نیز وجود دارند که به صورت ضربه در تابع چگالی طیف توان ، ظاهر می شوند. این مولفه ها ی باند باریک را به عنوان مولفه های خطی می شناسند. هر یک از چهار منبع مولد انتشار امواج آکوستیکی را بصورت مجمل توضیح می دهیم :

الف- امواجی که منبع مولدشان در دسته اول قرار می گیرد معمولا بر اثر چرخش میل لنگ های بسیار بزرگ ، چرخ دنده ها ، پیستون های متحرک ، سیستم احتراقی سیلندرها و توربین ها به وجود می آیند. یک مقدار جزیی عدم توازن (به اصطلاح بالانس نبودن اجزا) در هریک از قسمت های مکانیکی ، منجر به ارتعاش و در نتیجه ایجاد امواج آکوستیکی زیرآبی می شود. ثابت شده است که سیگنال های منتشره از این منابع دارای باند

طیفی باریک هستند. به طور ذهنی می توان تجسم کرد که این سیگنال ها مؤلفه هایی از فرکانس گردشی قسمت محرکه وسیله دریایی هستند و بنابراین تقریباً متناوب بوده و در گروه سیگنال های باند باریک قرار می گیرند. البته سیگنال های حاصل از اصطکاک که مؤلف های باند وسیع دارند را هم باید در این گروه در نظر گرفت ولی اهمیت چندانی ندارد.

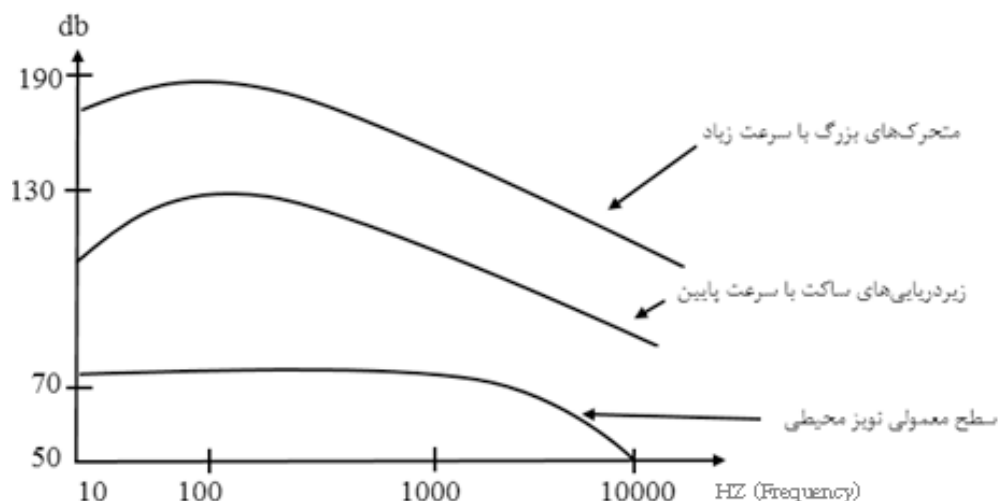
ب- نویز حاصل از پروانه کشتی : این امواج آکوستیکی که پراثری ترین نویز حاصل از حرکت کشتی هستند در اثر چرخش پروانه کشتی بوجود می آیند. به خاطر چرخش پره پروانه کشتی مناطق کم فشاری در اطراف پره ها ایجاد می شود و پایین آمدن فشار در این نواحی منجر به ایجاد انبوهی از حباب هوا شده و این حباب ها به تدریج نمو کرده و ناگهان می ترکند و از ترکیدن این حباب ها سیگنالی آکوستیک با انرژی قابل ملاحظه پدید می آید که از فواصل چندین کیلومتری قابل احساس است. سیگنالی که در اثر این فرایند به وجود می آید در محدوده سیگنال های باند وسیع قرار دارد. به خاطر آنکه انرژی سیگنال یا به عبارتی انرژی نویز حاصل در ارتباط با سرعت چرخش پروانه کشتی و در نتیجه متناسب با سرعت کشتی است و بنابراین شکل مشخصه آکوستیکی سیگنال تولیدی از پروانه کشتی ثابت نبوده و با تغییرات سرعت ، تغییر خواهد کرد. باید توجه داشت انرژی این سیگنال با افزایش عمق کاهش دارد.

ج- نویز حاصل از ماشین های جانبی : سیگنال های این گروه معمولاً از منابعی مثل ژنراتورهای مولد برق ، سیستم های تهویه ، پمپ ها و دستگاههای از این قبیل ناشی می شوند. نویزهایی که از این منابع در محیط منتشر می شوند به صورت مؤلفه های تونال در طیف فرکانسی ظاهر شده و از نظر دامنه و فرکانس تقریباً پایداری این تونال و عدم وابستگی آن ها به سرعت متحرک عامل سودمندی در شناسایی و کشف متحرک خواهد بود.

د- نویزهای هیدرو دینامیکی : برش و قطع امواج آب در اطراف دماغه ، بدنه و عقبه کشتی یک سیگنال نویز آکوستیکی ایجاد می کند که ناشی از عوامل متعدد هیدرودینامیکی است. این سیگنال از حیث انرژی بعد از سیگنال حاصل از گردش پروانه کشتی قرار می گیرد

۱-۸) مشخصه های آکوستیکی کلی متعلق به متحرک های دریایی

در شکل ۱-۱ کل حوزه فرکانسی مربوط به طیف سیگنال های تولید شده توسط متحرک های دریایی دیده می شود. به طوریکه مشهود است در فرکانس های بالاتر از ۱۰ کیلو هرتز طیف توان شیب تضعیف ۲۰ دسی بل بر در هر دهه (۲۰ dB/Decade) را دارد از درجه اهمیت ساقط می شود. در این شکل اطلاعات بسیار مهم دیگری نیز نهفته است . با توجه به شکل می توان دریافت که پایین ترین و ضعیفترین منحنی طیفی متعلق به زیردریایی های مخفی و غوطه وری است که با سرعت بسیار پایین و با نیروی محرکه الکتریکی حرکت می کنند و نویز حاصله از پروانه ندارند. محدوده بالایی متعلق به کشتی های بزرگ با سرعت بالاست و همانگونه که مشاهده می شود چیزی حدود ۵۰ تا ۷۰ دسی بل بالاتر از محدوده پایینی مشخصه متحرک های دریایی یعنی زیردریایی های مخفی است. در همین شکل منحنی مربوط به نویز دایمی محیط رسم شده است و همانطور که مشخص است چیزی در حدود ۴۰ تا ۵۰ دسی بل زیر منحنی مربوط به ضعیفترین سیگنال حاصل از متحرک های دریایی است. بنابراین می توان در شرایط خاص حضور خاموش ترین متحرک های دریایی را کشف کرد.



شکل ۱-۱- طیف مربوط به محدوده نویزهای آکوستیکی تولید شده توسط متحرک‌های دریایی

سیگنال‌هایی که در این مبحث توضیح داده شد سیگنال‌هایی هستند که معمولاً توسط یک متحرک دریایی تولید می‌شوند. و اگر قرار باشد حضور یک متحرک در محیط کشف و آشکار شود، استخراج و پردازش این سیگنال‌ها معمولاً در شرایط عادی اطلاعات کافی را در اختیار سیستم آشکار ساز قرار می‌دهند. در راستای عمل آشکار سازی بزرگترین مزاحم و دردسر‌آورترین موضوع، مسئله نویز است. مبحث نویزهای محیطی به همراه مطالبی که در این بخش مورد مشخصه آکوستیکی متحرک‌های دریایی آمده زمینه مناسبی را برای موضوعات ردیابی و مدل ردیابی فراهم کرده است.

۱-۹ خلاصه

در این فصل برخی از پدیده‌های طبیعی محیط زیرآب را مثل تغییرات سرعت صوت با پارامترهای محیط، پدیده شکست معرفی کرده سپس مفهوم سیستم‌های آکوستیکی فعال و غیرفعال را توضیح دادیم. در سیستم‌های آکوستیکی فعال پدیده بازآوایش نقش حیاتی دارد ولیکن در سیستم‌های آکوستیکی غیرفعال همین پدیده مزاحم کار پردازش می‌شود. نویز به عنوان یک پدیده اجتناب‌ناپذیر در هر سیستم پردازشی بعنوان عاملی

مزاحم تلقی می‌شود و برای محدود کردن میزان مزاحمت و اختلال آن باید منابع مولد آن را شناخت و سپس مدلی تقریبی برای آن برگزیدو با در نظر گرفتن این مدل سعی در رفع مزاحمت‌های ناشی از این پدیده کرد. در این فصل منابع مختلف نویز ، برای محدوده های مختلف حوزه فرکانس عرضه شده است.

فصل دوم

تخمین حالت در سیستم های دینامیکی

۲-۱) مقدمه

یکی از مهمترین موضوعات در سیستم های دینامیکی بحث تخمین متغیرهای حالت غیرقابل مشاهده با استفاده از مدل دینامیکی سیستم ، معادله و داده های مشاهده می باشد. مسئله ردیابی اهداف نمونه ای از مسئله فیلترینگ است. در این مسئله هدف مورد ردیابی به عنوان سیستم دینامیکی مطرح است. در مسئله ردیابی هدف، تخمین بردار حالت سیستم از روی داده های مشاهده با استفاده از معادلات دینامیکی انجام می شود. از روش های ردیابی اهداف زیرآب، توسط سونارهای غیرفعال که طی سال های گذشته و توسط افراد مختلف ارائه شده است، می توان به ردیابی اهداف با استفاده از روش LS^{12} [9] ، روش های دیگری مانند ردیابی اهداف با

¹² Least squares

استفاده ^{۱۳} PF [10]، ردیابی اهداف زیرآب با استفاده از روش ^{۱۴} EKF [11-12]، ردیابی اهداف زیرآب با گونه‌های مختلفی از روش ^{۱۵} UKF [13-14] اشاره کرد.

صافی کالمن مشهورترین صافی است که در موضوع صافی کردن در سیستم‌های دینامیکی مطرح است این صافی که یک تخمین‌گر براساس معیار MMSE است، برای سیستم‌های دینامیکی با معادلات خطی و نویزهای گوسی، راه حل بهینه را ارائه می‌دهد. اما در بسیاری از مسائل تخمین از جمله ردیابی اهداف، معادلات غیرخطی بوده در این شرایط دیگر عملکرد صافی کالمن بهینه نخواهد بود. بنابراین در این حالت مسئله تخمین در سیستم‌های غیرخطی مطرح می‌شود. در این فصل ما به بررسی انواع روش‌های صافی کالمن می‌پردازیم. صافی کالمن EKF براساس خطی سازی سیستم می‌باشد.

۲-۲) صافی کالمن

صافی کالمن یک صافی بازگشتی کارآمد است که حالت یک سیستم پویا را از یک سری اندازه‌گیری‌های همراه با خطا برآورد می‌کند. این صافی به همراه یک تنظیم‌کننده خطی مرتبه دوم ، مسائل کنترل گوسی مرتبه دوم را حل می‌کند. صافی کالمن ، ^{۱۶} LQR و ^{۱۷} LQG راه حلی برای یکی از اساسی‌ترین مسائل کنترل هستند. [۱۵]

¹³ particle filter

¹⁴ Extended Kalman filter

¹⁵ Unscented Kalman filter

¹⁶ Linear quadratic regulator

¹⁷ Linear-Quadratic-Gaussian

این صافی در طیف گسترده ای از کاربرد های مهندسی از رادار گرفته تا بصیرت رایانه ای کاربرد دارد. همچنین در روش تصفیه کالمن یکی از عناوین مهم در نظریه کنترل و مهندسی سیستم های کنترلی می باشد .

به عنوان مثال برای کاربری آن در رادار ، اطلاعات در مورد موقعیت ، سرعت و شتاب هدف به خاطر وجود نویز با حجم عظیمی از انحراف در هر لحظه اندازه گیری می شود. صافی کالمن از پویایی هدف بهره می گیرد به این صورت که سیر تکاملی آن را کنترل می کند ، تا تاثیرات نویز را از بین ببرد و یک برآورد خوب از موقعیت هدف در زمان حال (تصفیه کردن) و در آینده (پیش بینی کردن) و یا در گذشته (الحاق یا هموار سازی) ارائه می دهد.

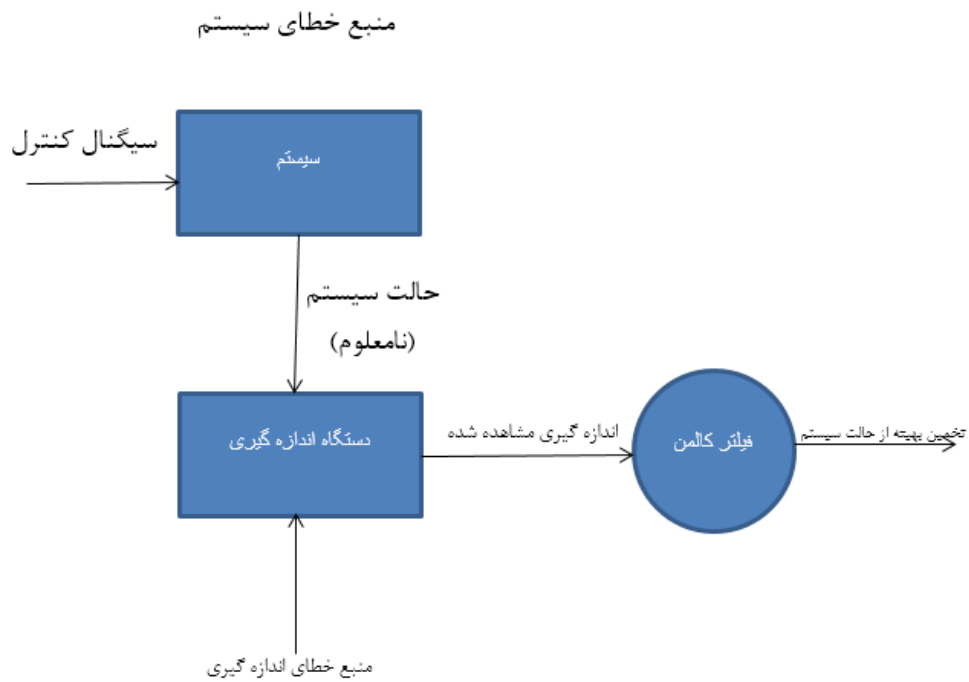
این صافی به افتخار رادلف کالمن ، صافی کالمن نام گذاری شد و استنلی اشمیت عموماً به خاطر توسعه اولین پیاده سازی صافی کالمن شهرت یافت. این رخداد هنگام ملاقات وی با کالمن در مرکز تحقیقاتی ناسا روی داد و وی شاهد کارائی ایده کالمن در برآورد مسیر پرتاب پروژه آپولو بود، که منجر به الحاق آن به رایانه ناوبری آپولو شد. [۱۶]

این صافی بر روی کاغذ در سال ۱۹۵۸ توسط سورلینگ ، در ۱۹۶۰ توسط کالمن و در ۱۹۶۱ توسط کالمن و بوسی ایجاد و بسط داده شد.

۲-۲-۱) شمای کلی صافی کالمن :

صافی کالمن یک مکانیزم ریاضی است که با استفاده از اطلاعاتی در مورد سیستم و وسیله اندازه گیری ،

تخمینی از حالت سیستم را بدست می دهد.



شکل (۲-۱) - شمای کلی صافی کالمن

در تئوری کنترل ، صافی کالمن بیشتر به برآورد مرتبه دوم (LQE^{18}) اشاره دارد . امروزه تنوع گسترده ای از صافی کالمن به وجود آمده ، از فرمول اصلی کالمن در حال حاضر صافی‌های : کالمن ساده ، توسعه یافته اشمیت ، کالمن گروهی ، اطلاعاتی و صافی های گوناگون جذر بیرمن ، تورنتون و بسیاری دیگر به وجود آمده اند. گویا مرسوم ترین نوع صافی کالمن حلقه قفل فاز^{۱۹} می باشد که امروزه در رادیو ها ، رایانه ها و تقریبا انواع ابزار های تصویری و ارتباطی کاربرد دارد.

اساس مدل سیستم پویای صافی‌های کالمن براساس سیستم های خطی پویا^{۲۰} گسسته در بازه زمانی هستند. آنها براساس زنجیره مارکوف^{۲۱} مدل شده ، به کمک عملگرهای خطی ساخته شده اند و توسط نویز گوسی

¹⁸ Linear Quadratic Estimation

¹⁹ Phase Locked Loop

²⁰ Linear Dynamical Systems

²¹ Markov chain

^{۲۲} تحریک می شوند. حالت سیستم توسط برداری از اعداد حقیقی بیان می شود. در هر افزایش زمانی که در بازه های گسسته صورت می گیرد ، یک عملگر خطی روی حالت فعلی اعمال می شود تا حالت بعدی را با کمی نویز ایجاد کند و در صورت شناخت روی کنترل کننده های سیستم برخی اطلاعات مرتبط را استخراج می کند. صافی کالمن قادر است مشابه مدل نامشخص مارکوف برخورد کند . با این تفاوت کلیدی که متغیرهای حالت نا مشخص در یک فضای پیوسته مقدار می گیرند (نقطه مقابل فضای حالت گسسته در مدل مارکوف). بعلاوه ، مدل نامشخص مارکوف می تواند یک توزیع دلخواه برای مقادیر بعدی متغیرهای حالت ارائه کند ، که در تناقض با مدل پارازیت گوسی است که در صافی کالمن استفاده می شود.[۱۵]

۲-۲-۳ عملکرد صافی کالمن :

در بسیاری از اوقات مدل یک شی را در یک صفحه نویزی در اختیار داریم . در این موارد می خواهیم X را مدل کنیم در حالیکه Z را مشاهده می نماییم. که X و Z بردارهای خصیصه هستند که ممکن است از نظر ابعاد با هم مساوی نباشند.

صافی کالمن یک مکانیزم بازخوردی را پیشنهاد می کند که با استفاده از آن می توانیم Z_k را مشاهده کنیم ، X_k را تقریب بزنیم ، X_{k+1} را پیش بینی کنیم و سپس Z_{k+1} را مشاهده نماییم و با استفاده از پیش بینی های فوق ، تقریب X_{k+1} را به روز کنیم [18]

به این ترتیب در این صافی با یک سیکل تکرار مطابق شکل زیر مواجه هستیم :

²² Gaussian Noise



شکل (۲-۲) - عملکرد کلی صافی کالمن

۲-۲-۴) صافی کالمن خطی :

اولین نسخه از صافی کالمن که دقیقا همان مدلی از آن است که در سال ۱۹۶۰ معرفی شد ، صافی کالمن خطی می باشد که در آن دو فرض اساسی وجود داشت [۱۵].

الف) مشاهده با استفاده از توابع خطی از شرایط مورد بررسی ، بدست می آیند.

ب) نویز در سیستم و اندازه گیری، نویز سفید و گوسی می باشد.

این صافی به شکل کلی زیر مدل می شود :

$$X_{k+1} = A_k X_k + W_k \quad (۱-۲)$$

به طوری که در آن :

A_k : ماتریسی است که حالت فعلی را به قبلی مرتبط می کند.

W_k : نویز روی مقدار حالت سیستم که از نوع گوسی با میانگین صفر است.

همچنین فرض می کنیم W_k دارای کوواریانس Q_k باشد.

مشاهده در لحظه فعلی

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (2-2)$$

H_k : ماتریس های اندازه گیری هستند که نشان دهنده چگونگی مرتبط شدن مشاهدات به مدل می باشند.

V_k : نویز روی متغیر های اندازه گیری که از نوع گوسی با میانگین صفر و کوواریانس می باشد.

حال اگر X_{k-1} (یا یک تقریب از آن یعنی $\hat{X}_{k-1}$) را در اختیار داشته باشیم ، با استفاده از مدل صافی

کالمن می توانیم یک تقریب اولیه برای X_k بدست آوریم.

پیش بینی برای مدل در لحظه فعلی:

$$X_k = A_{k-1} X_{k-1} \quad (3-2)$$

این تقریب اولیه معمولاً در مقالات مربوط به صورت $\hat{X}_k = A_{k-1} X_{k-1}$ نشان داده می شود که در آن :

$\hat{\quad}$ نشان دهنده تقریب و $^-$ نشان دهنده زمان قبل از مشاهده است.

به این ترتیب X_k^+ یعنی تقریب به روز شده که بعد از مشاهده است .

همچنین خطاهایی که همراه هر پیش بینی وجود دارد به صورت خطا قبل از مشاهده و خطای بعد از مشاهده

تعریف می شوند :

$$e_K^+ = X_K - \hat{X}_K^+ \quad (4-2)$$

$$e_K^- = X_K - \hat{X}_K^- \quad (5-2)$$

اکنون P_K^+ و P_K^- را به عنوان کوواریانس این دو خطا در نظر می گیریم.

یاد آوری می شود که این خطاها توسط نویز W_K در رابطه $X_{k+1} = A_k X_k + W_k$ و خطای ناشی از پیش بینی ایجاد شده اند.

صافی کالمن با اندازه گیری مقدار $Z_k - H_k \hat{X}_K^-$ محاسبات را انجام می دهد.

در این مرحله هدف این است که یک ماتریس بهره کالمن^{۲۳} بدست آوریم تا بتوانیم $\hat{X}_K^-$ را به روز نماییم:

$$\hat{X}_K^+ = \hat{X}_K^- + K_K (Z_K - H_K \hat{X}_K^-) \quad (6-2)$$

ماتریس K_K این خاصیت را خواهد داشت که P_K^+ (ماتریس کوواریانس e_K^+) را حداقل نماید. در این صورت به یک صافی خطی بهینه دست خواهیم یافت.

برای بدست آوردن K_K داریم:

$$e_K^+ = X_K - \hat{X}_K^+ = X_K - (\hat{X}_K^- + K_K (Z_K - H_K \hat{X}_K^-)) \quad (7-2)$$

²³ Kalman gain

که اگر P_K^+ (ماتریس کوواریانس e_K^+) را حساب کرده و نسبت به K_K دیفرانسیل گرفته و حاصل را برابر صفر قرار دهیم ، به رابطه زیر می رسیم.

$$K_K = P_K^- H_K^T (H_K P_K^- H_K^T + R_K)^{-1} \quad (۸-۲)$$

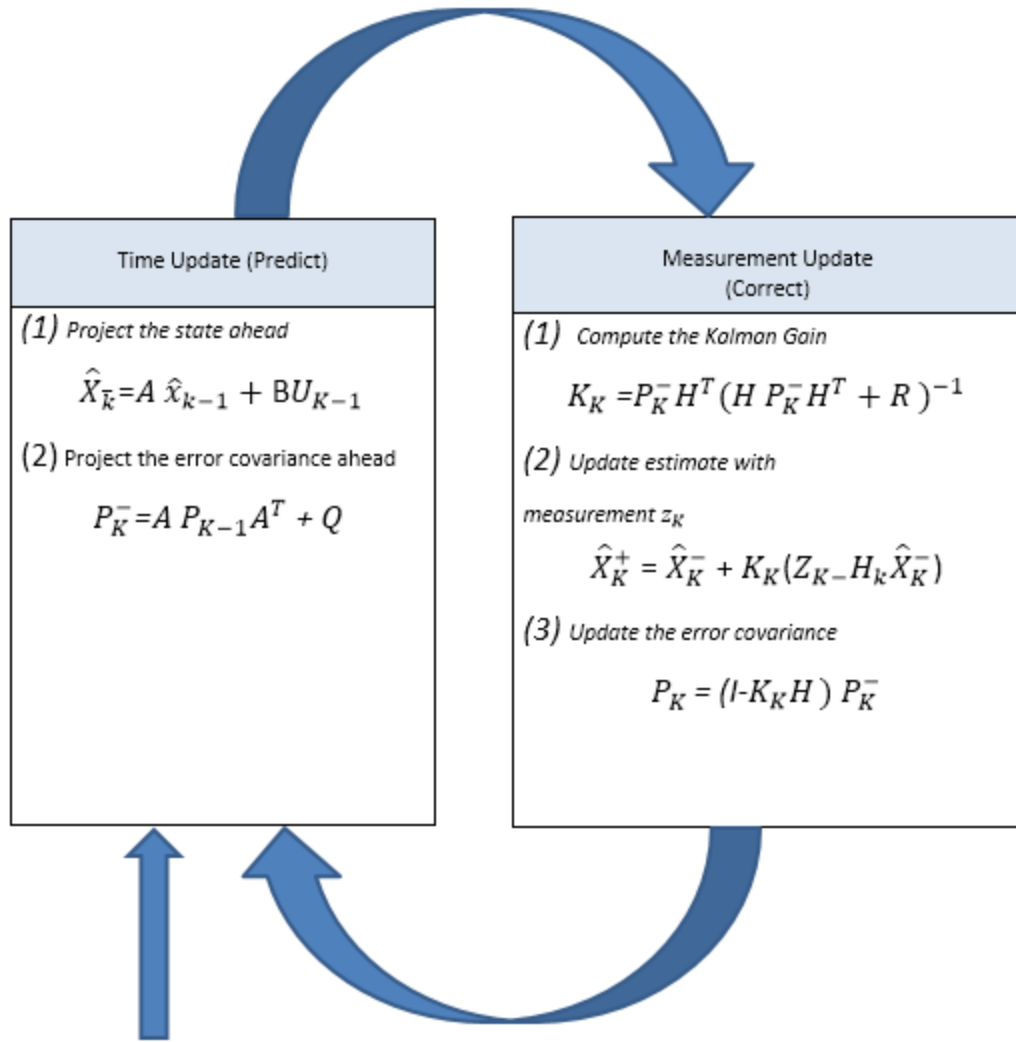
رابطه (۸-۲) بهره صافی کالمن را ارائه می کند. با توجه به این رابطه، بهره کالمن متناسب با کواریانس پیش‌بینی بوده و با کواریانس مشاهدات نسبت عکس دارد؛ بنابراین برای شرایطی که پیش‌بینی‌ها از دقت پایینی برخوردار باشند، یعنی کواریانس پیش‌بینی بالا باشد و یا بر عکس مشاهدات از دقت بالایی برخوردار باشند، بهره صافی افزایش می‌یابد تا در تجدید بردار حالت وزن بیشتری را به مشاهدات دریافتی اختصاص دهد؛ ولی برای شرایطی که پیش‌بینی از دقت خوبی برخوردار باشد و یا مشاهدات دقت پایینی داشته باشند، صافی کالمن با کاهش بهره سعی در تخمین پارامتر مطلوب براساس پیش‌بینی خودش خواهد داشت.

$$P_K^- = A_K P_{K-1}^+ A_K^T + Q_{K-1} \quad (۹-۲)$$

و می توان نشان داد که کوواریانس خطا بعد از مشاهده برابر است با :

$$P_K^+ = (I - K_K H_K) P_K^- \quad (۱۰-۲)$$

۲-۲-۵) الگوریتم تکرار صافی کالمن در یک نگاه:



Initial estimates for $\hat{x}_{k-1}$ and P_{k-1}

شكل ٣-٢ الگوریتم تکرار صافی کالمن

۲-۳) صافی کالمن توسعه یافته^{۲۴} :

چنانچه اشاره شد صافی کالمن خطی با یک فرض اساسی قابل اجرا بوده ، و آن فرض خطی بودن مدل مورد بررسی می باشد. اما همان طور که می دانیم بیشتر سیستم ها را نمی توان بصورت خطی مدل کرد.

برای رفع این مشکل صافی کالمن توسعه یافته به شرح زیر معرفی شد :

مدل سیستم و مشاهده غیر خطی زیر به همراه نویز جمع شونده با آن ها را در نظر بگیرید :

$$X_k = f(X_{k-1}) + W_{k-1} \quad (۱۱-۲)$$

$$Z_k = h(X_k) + V_k \quad (۱۲-۲)$$

همچنین حالت اولیه سیستم را به صورت یک بردار تصادفی X_0 با میانگین μ_0 و کواریانس P_0 در نظر می گیریم. توابع برداری $f(.)$ و $h(.)$ و مشتق اول آن ها در دامنه مورد بررسی پیوسته هستند. [۱۹]

نکته مهم در استفاده از EKF این است که غیر خطی بودن توابع برداری f و h باید کم باشد . به عبارت دیگر غیر خطی بودن این توابع باید به مقداری باشد که بتوان آن ها را با استفاده از سری تیلور تقریب زد .

همانطور که دیدیم عملکرد صافی کالمن در دو گام انجام می شود . اکنون نحوه عملکرد EKF را در این دو گام مورد بررسی قرار می دهیم :

²⁴ Extended Kalman Filter

گام اول ، پیش بینی

از آن جا که در ابتدا فقط میانگین μ_0 و کواریانس P_0 از حالت اولیه سیستم در اختیار ماست تخمین بهینه اولیه و کوواریانس خطا برابرند با :

$$X_0^a = \mu_0 = E[X_0] \quad (۱۳-۲)$$

$$P_0 = E[(X_0 - X_0^a)(X_0 - X_0^a)^T] \quad (۱۴-۲)$$

اکنون با فرض اینکه یک تخمین بهینه به صورت $X_{K-1}^a = E[X_{K-1} Z_{K-1}]$ با کوواریانس P_{K-1} در لحظه $K-1$ داشته باشیم ، قسمت قابل پیش بینی X_K برابر است با :

$$X_K^f \equiv E[X_{K-1} Z_{K-1}] \quad (۱۵-۲)$$

$$= E[f(X_{K-1}) + W_{K-1} Z_{K-1}]$$

$$= E[f(X_{K-1}) Z_{K-1}]$$

حال سری تیلور $f(.)$ را حول X_{K-1}^a می نویسیم

$$f(X_{K-1}) \equiv f(X_{K-1}^a) + J_f(X_{K-1}^a)(X_{K-1} - X_{K-1}^a) + H.O.T \quad (۱۶-۲)$$

بدیهی است که در این جا چون با توابع برداری مواجه هستیم از ماتریس ژاکوبین برای مشتق گیری استفاده می کنیم که به صورت زیر تعریف می شود :

$$J_f \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (۱۷-۲)$$

و نکته قابل توجه دیگر اینکه قسمت های با مرتبه بالاتر قابل چشم پوشی هستند . به همین دلیل صافی کالمن توسعه یافته را صافی مرتبه اول هم می نامند.

همان طور که بیان شد :

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))^T \text{ and } X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \quad (۱۸-۲)$$

$$f(X_{K-1}) \equiv f(X_{K-1}^a) + J_f(X_{K-1}^a)(X_{K-1} - X_{K-1}^a) + H.O.T \quad (۱۹-۲)$$

اکنون داریم :

$$f(X_{K-1}) \approx f(X_{K-1}^a) + J_f(X_{K-1}^a)e_{k-1} \quad (۲۰-۲)$$

به طوریکه

$$e_{k-1} \equiv X_{K-1} - X_{K-1}^a \quad (۲۱-۲)$$

بنابراین امید ریاضی $f(X_{K-1})$ به شرط مشاهده Z_{K-1} برابر است با :

$$E\{X_{K-1} | Z_{K-1}\} \approx f(X_{K-1}^a) + J_f(X_{K-1}^a) E\{e_{k-1} | Z_{K-1}\} \quad (۲۲-۲)$$

و در شرایطی که $E\{e_{K-1} | Z_{K-1}\} = 0$ باشد مقدار پیش بینی شده برای X_K برابر است با :

$$X_K^f \approx f(X_{K-1}^a) \quad (۲۳-۲)$$

به همین ترتیب خطای پیش بینی شده و کوواریانس آن از روابط زیر بدست می آیند :

$$e_k^f \equiv X_K^f - X_K^f \quad (۲۵-۲)$$

$$= f(X_{K-1}) + W_{k-1} - f(X_{K-1}^a)$$

$$\approx J_f(X_{K-1}^a) e_{k-1} + W_{k-1}$$

$$P_K^f \equiv E[e_k^f (e_k^f)^T] \quad (26-2)$$

$$= J_f(X_{K-1}^a) E[e_{k-1} e_{k-1}^f] J_f^T(X_{K-1}^a) + E[W_{k-1} W_{k-1}^T]$$

گام دوم ، تصحیح :

در لحظه ی K ام با دو نمونه از اطلاعات مواجه هستیم :

مقدار پیش بینی شده X_K^f با کوواریانس P_K^f و مقدار اندازه گیری شده (مشاهده شده) Z_K با کوواریانس R_K . اکنون هدف ما این است که مقدار بهینه X_K^a را برای X_K تخمین بزنیم .

محاسبات همانند آنچه درصافی کالمن خطی بررسی شد انجام می شود و داریم :

$$x_k^a = x_k^f + K_k (z_k - E[h(x_k) | z_k]) \quad (27-2)$$

چنانچه اشاره شد $h(.)$ نیز یک تابع غیر خطی می باشد که با نوشتن سری تیلور حول X_K^a برای آن خواهیم

داشت :

$$h(x_k) \triangleq h(x_k^f) + J_h(x_k^f) (x_k - x_k^f) + H.O.T \quad (28-2)$$

بنابراین به طریق مشابه داریم :

$$E[h(x_k) | z_k] \approx h(x_k^f) + J_h(x_k^f) E[e_k^f | z_k] \quad (29-2)$$

و در شرایطی که $E[e_k^f / Z_K] = 0$ باشد حالت پیش بینی شده برابر است با :

$$x_k^a \approx x_k^f + K_k(z_k - h(x_k^f)) \quad (30-2)$$

همچنین خواهیم داشت :

$$e_k \equiv (I - K_k J_h(x_k^f)) J_f(x_{k-1}^a) e_{k-1} + (I - K_k J_h(x_k^f)) W_{k-1} - K_k V_k \quad (31-2)$$

و کواریانس خطای بعد از مشاهده :

$$P_k \equiv E[e_k^T e_k] \quad (32-2)$$

$$\begin{aligned} &= (I - K_k J_h(x_k^f)) J_f(x_{k-1}^a) P_{k-1} J_f^T(x_{k-1}^a) (I - K_k J_h(x_k^f))^T \\ &\quad + (I - K_k J_h(x_k^f)) Q_{k-1} (I - K_k J_h(x_k^f))^T + K_k R_k K_k^T \\ &= (I - K_k J_h(x_k^f)) P_k^f (I - K_k J_h(x_k^f))^T + K_k R_k K_k^T \\ &= P_k^f - K_k J_h(x_k^f) P_k^f - P_k^f J_h^T(x_k^f) K_k^T + K_k J_h(x_k^f) P_k^f J_h^T(x_k^f) K_k^T + K_k R_k K_k^T \end{aligned}$$

چنانچه بیان شد ماتریس K_K این خاصیت را خواهد داشت که P_K^+ (کوواریانس e_k^+) را حداقل کند

بهره کالمن برابر است با :

$$K_k = (P_k^f J_h^T(x_k^f) U_h(x_k^f) P_k^f J_h^T(x_k^f) + R_k)^{-1} \quad (۳۳-۲)$$

البته روش EKF مرتبه اول هرچند در کاربردهای عملی بسیار استفاده می‌شود، اما دقت چندان خوبی ندارد. یکی

از ایده‌هایی که برای افزایش دقت ممکن است به ذهن برسد افزایش مرتبه سری تیلور، به عنوان مثال استفاده

تقریب مرتبه دوم می‌باشد. در ادامه خواهیم دید نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که کارایی این تقریب مرتبه

دوم در مقایسه با صافی EKF مرتبه اول بهبود قابل توجهی دارد. اما صافی کالمن مرتبه دوم و بالاتر به دلیل

حجم محاسبات زیاد و بهبود کارایی محدود یا مرزی این روش، کاربرد فراوانی در مسائل عملی ندارند. برای

کارایی بهتر می‌توان از صافی‌هایی چون UKF استفاده کرد. [۱۳]

۲-۴) شبیه سازی صافی □□□ :

۲-۴-۱) ردیابی سیگنال سینوسی تصادفی

در این قسمت مثالی کاربردی از یک سیستم غیرخطی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. غیر خطی بودن در مدل اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است که می‌توان این غیرخطی بودن را در مدل سیستم بیان نمود و مدل مشاهدات را خطی در نظر گرفت.

بردار حالت را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$X_k = (\theta_k \quad \omega_k \quad a_k)^T \quad (2-34)$$

که θ پارامتر تابع سیستم در زمان k و ω سرعت زاویه ای در زمان k و a_k دامنه در مرحله k می باشد

$$\frac{da}{dt} = \omega_a(t) \quad (2-35)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega_\omega(t) \quad (2-36)$$

به این ترتیب مدل دینامیکی زمان پیوسته سیستم به شکل زیر خواهد بود

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} w(t) \quad (2-37)$$

$W(t)$ مقدار نویز مدل می‌باشد. پس از گسسته سازی:

$$X_k = \begin{pmatrix} 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x_{k-1} + Q_{k-1} \quad (38-2)$$

$$Q_{k-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \Delta t^3 q_1 & \frac{1}{2} \Delta t^2 q_1 & 0 \\ \frac{1}{2} \Delta t^2 q_1 & \Delta t q_1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t q_2 \end{pmatrix} \quad (39-2)$$

همانطور که اشاره شد در این مثال غیرخطی بودن را در مدل اندازه‌گیری در نظر گرفتیم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$h(x_k, k) = a_k \sin(\theta_k) \quad (40-2)$$

بنابراین مدل اندازه‌گیری به صورت زیر خواهد بود

$$y_k = h(x_k, k) + R_k = a_k \sin(\theta_k) + R_k \quad (41-2)$$

به طوریکه R یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کواریانس ۱ می‌باشد.

با مشتق‌گیری از تابع اندازه‌گیری داریم :

$$\frac{\partial h(x_k, k)}{\partial \theta_k} = a_k \cos(\theta_k) \quad (42-2)$$

$$\frac{\partial h(x_k, k)}{\partial \omega_k} = 0 \quad (43-2)$$

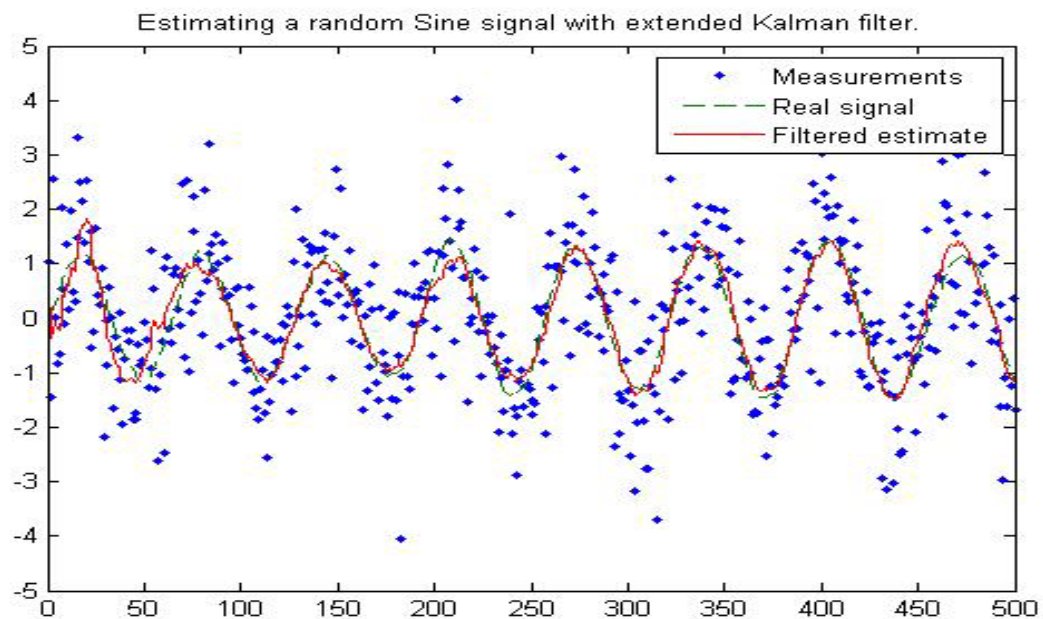
$$\frac{\partial h(x_k, k)}{\partial a_k} = \sin(\theta_k) \quad (44-2)$$

ماتریس ژاکوبین مورد نیاز برای استفاده از EKF به صورت زیر تعریف می‌شود.

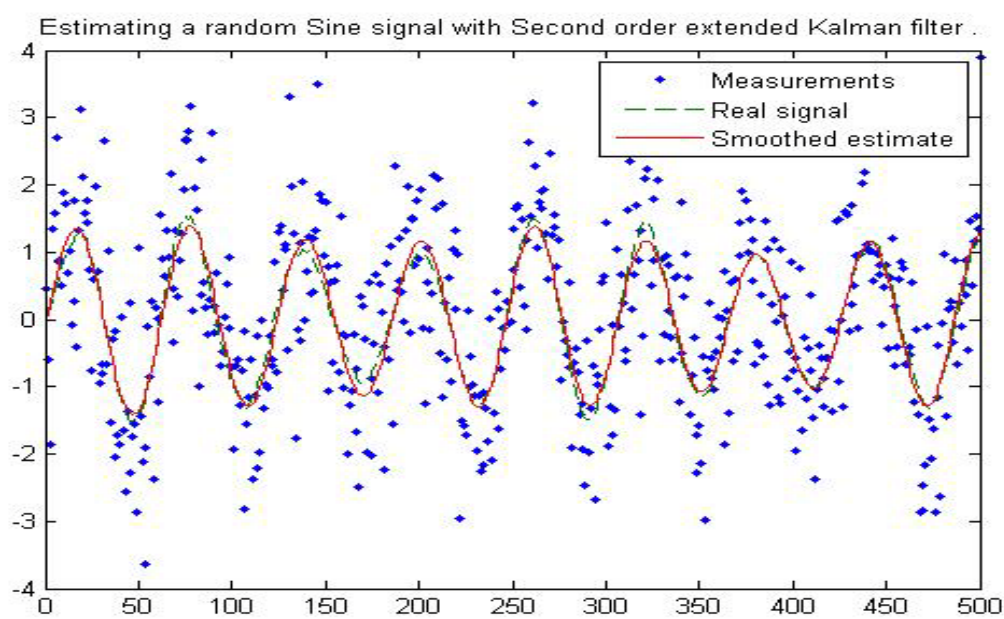
$$H_x(m, k) = (a_k \cos(\theta_k) \quad 0 \quad \sin(\theta_k)) \quad (45-2)$$

با توجه به نکاتی که درباره صافی کالمن EKF گفته شد ماتریس ژاکوبین مرتبه دوم به صورت زیر می‌باشد.

$$H_{xx}(m, k) = \begin{pmatrix} -a_k \sin(\theta_k) & 0 & \cos(\theta_k) \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta_k) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (46-2)$$



شکل ۲-۴ تخمین سیگنال سینوسی با استفاده از EKF مرتبه اول



شکل ۲-۵ تخمین سیگنال سینوسی با استفاده از EKF مرتبه دوم

۲-۵) صافی کالمن بی رد^{۲۵}:

این روش یک تابع غیرخطی از یک متغیر تصادفی را با استفاده از رگرسیون خطی بین n نقطه از توزیع قبلی آن، خطی سازی می کند. بنابراین به یک روش خطی سازی دست خواهیم رسید که از خطی سازی به روش تیلور دقیق تر است [۱۵، ۱۷].

در EKF توزیع حالت سیستم به یک تابع خطی مرتبه اول تبدیل می شد که این کار میانگین و کوواریانس توزیع اصلی را دست خوش تغییرات نامطلوب می کرد. اما UKF روش نمونه برداری غیر احتمالی است که در آن نیازی به مشتق گیری هم نیست. در اینجا توزیع حالت سیستم با استفاده از یک مجموعه مینیمال از چندین نقطه که با دقت انتخاب شده و آن ها را نقاط سیگما می نامیم، نمایش داده می شود [۲۰].

برخلاف EKF که تابع غیرخطی $f(.)$ و $h(.)$ را با استفاده از سری تیلور توسط توابعی خطی تقریب می زند و در نتیجه موجب بدست آمدن تابع چگالی احتمال پسین گوسی را فراهم می کند، در روش UKF تابع چگالی احتمال پسین $p(x_k | Z_k)$ با استفاده از یک سری نمونه های مشخص در زمان نمونه K ام، بصورت تابعی گوسی تقریب زده می شود. به این دسته از صافی های غیرخطی صافی های $LPKF$ نیز گفته می شود، چرا که در آن ها از خطی سازی آماری بجای خطی سازی تحلیلی استفاده شده است. اعضای این خانواده از تخمین گرهای غیر خطی تنها در نحوه انتخاب نمونه ها از نظر تعداد آنها، مقدار آنها و یا وزن های مربوط به آنها با هم متفاوت بوده، در حالیکه مجموعه معادلات صافی سازی در همه آن ها یکسان است.

²⁵ Uncented kalman filter

اساس کار UKF بر پایه UT (تبدیل بی‌رد) بنا نهاده شده است. تبدیل بی‌رد روشی است برای بدست آوردن

مشخصه‌های یک بردار تصادفی که از یک تابع غیرخطی عبور می‌کند. [۲۱]

بردار تصادفی a را با میانگین $\bar{a}$ و کواریانس P_a در نظر بگیرید که از تابع غیر خطی $g(a)$ عبور کرده و بردار b را حاصل نماید.

$$b = g(a) \quad (۴۷-۲)$$

دو لحظه اول بردار تصادفی b توسط تبدیل بی‌رد به شکل زیر بدست می‌آیند :

در ابتدا n_a+1 نمونه و وزن‌های مربوط به آن‌ها، (A_i, w_i) بطور مشخص به گونه ای توسط الگوریتم بی‌رد

حاصل می‌شوند که می‌توانند میانگین و کواریانس a را بدست آورند.

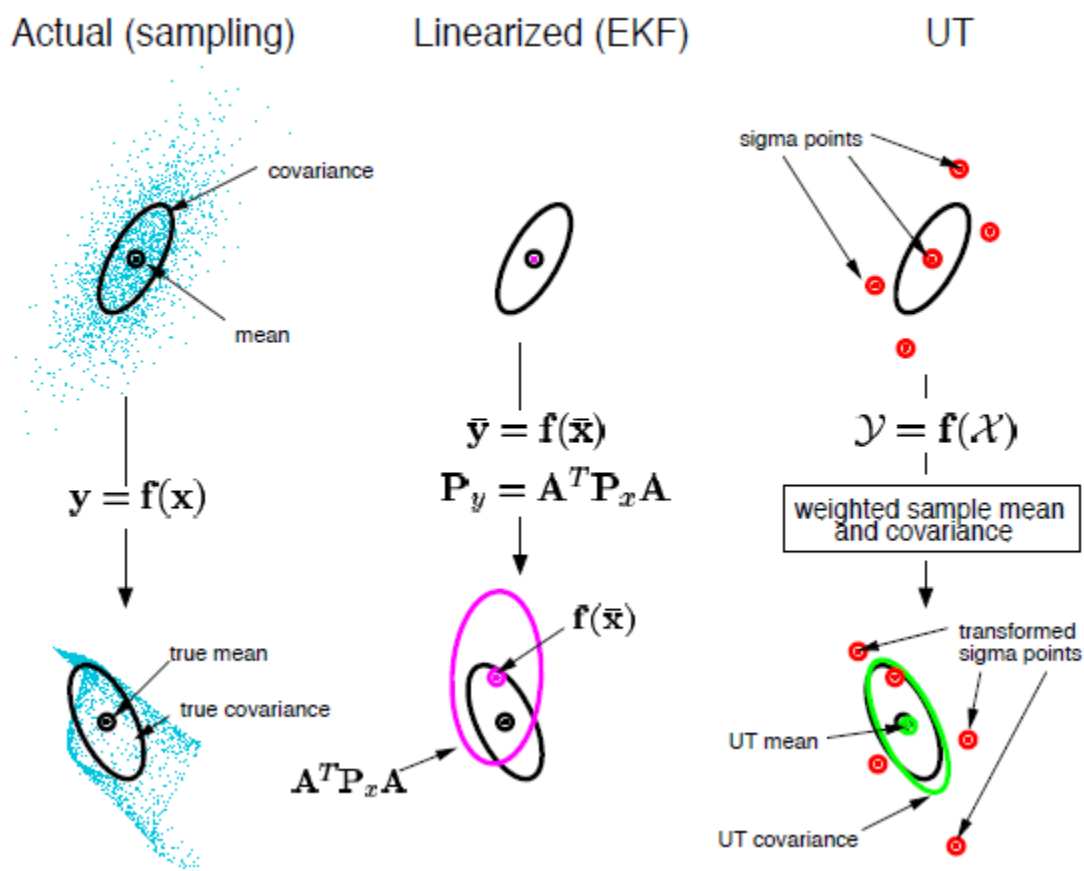
$$A_0 = \bar{a} \quad i=0 \quad (۴۸-۲)$$

$$w_0 = \frac{k}{n_a+k} \quad (۴۹-۲)$$

$$A_i = \bar{a} + (\sqrt{(n_a+k)P_a}) \quad i=1, \dots, n_a \quad (۵۰-۲)$$

$$w_i = \frac{1}{2(n_a+k)} \quad (۵۱-۲)$$

$$A_i = \bar{a} - (\sqrt{(n_a+k)P_a}) \quad i=n_a+1, \dots, 2n_a \quad (۵۲-۲)$$



شکل ۲-۶ مقایسه تبدیل χ^2 با χ^2

K پارامتر ثابتی است بطوریکه $k+n \neq 0$ و $\sqrt{(n_a + k)P_a}$ ، i امین ستون ماتریس حاصله از ریشه دوم

ماتریس $(n_a + k)P_a$ می‌باشد. وزن‌های w_i ، نرمالیزه شده هستند بطوریکه $\sum_{i=1}^{2n_a} w_i = 1$

قابل ذکر است با افزایش دیمانسیون بردار a یعنی n_a ، فاصله بین نمونه‌های بدست آمده، A_i ، $i=1, \dots, n_a$

تا $\bar{a}$ افزایش می‌یابد. این فاصله را تا حدودی می‌توان توسط انتخاب مناسب k کنترل کرد. وقتی k منفی

باشد، ممکن است که P_a دیگر نیمه مثبت معین نشود که در اینصورت باید به دنبال روش‌هایی برای از بین بردن این مشکل بود.

با توجه به نمونه‌ها و وزن‌های انتخابی آن‌ها توسط این الگوریتم به راحتی دیده می‌شود از آنجایی که نمونه‌ها بصورت متقارن حول $\bar{a}$ پخش شده‌اند، میانگین وزندار آن‌ها برابر میانگین a می‌باشد:

$$\sum_{i=0}^{2n_a} w_i A_i = w_0 A_0 + \sum_{i=0}^{2n_a} w_i A_i \quad (53-2)$$

$$= \frac{k}{n_a+k} \bar{a} + \frac{2n_a}{2(n_a+k)} \bar{a} = \bar{a}$$

و نیز برای ماتریس کواریانس داریم :

$$P = \sum_{i=0}^{2n_a} w_i (A_i - \bar{a})(A_i - \bar{a})^T \quad (54-2)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_a} 2w_i (n_a+k)(\sqrt{P_a})(\sqrt{P_a})^T$$

$$= \sum_{i=1}^{n_a} (\sqrt{P_a})(\sqrt{P_a})^T = P_a$$

حال چنانچه این نمونه‌ها از تابع غیرخطی g عبور کنند، در خروجی n_a+1 نمونه جدید به نام B_i ایجاد می‌کند بطوریکه :

$$B_i = g(A_i) \quad (i=0,1,\dots,2n_a) \quad (55-2)$$

و تخمین هایی از دو لحظه اول b به فرم زیر حاصل می شوند:

$$\bar{b} = \sum_{i=0}^{2n_a} w_i B_i$$

$$P_b = \sum_{i=0}^{2n_a} w_i (B_i - \bar{b})(B_i - \bar{b})^T \quad (56-2)$$

در [۲۱] نشان داده شده است که چنانچه a گوسی باشد دقت تخمین های حاصل شده با استفاده از تبدیل بی رد ، برابر دقت تخمین ها در حالتی است که از بسط سری تیلور مرتبه سوم تابع غیر خطی g استفاده کنیم. اما چنانچه a غیرگوسی باشد، دقت تخمین های حاصل شده با این روش برابر دقت تخمین ها در حالتی است که از بسط تیلور مرتبه دوم تابع g استفاده کنیم.

قابل ذکر است که حتی اگر a گوسی باشد بطور کلی با عبور از تابع غیر خطی $g(a)$ ، خاصیت گوسی بودن خود را حفظ نمی کند. از آنجاییکه با استفاده از تبدیل unscented ، بعنوان میانگین و کواریانس تابع چگالی احتمال گوسی تلقی می شود که به عنوان تقریبی برای تابع چگالی احتمال پسین غیرگوسی واقعی در فیلترینگ غیرخطی UKF بکار می روند.

$$x_{k-1}^0 = \hat{x}_{k-1|k-1} \quad i=0 \quad (57-2)$$

$$W_{k-1}^0 = \frac{k}{n_x + k}$$

$$x_{k-1}^i = \hat{x}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(n_x + k)\hat{p}_{k-1|k-1}}) \quad i=1, \dots, n_x \quad (58-2)$$

$$W_{k-1}^i = \frac{1}{2(n_x + k)}$$

$$x_{k-1}^i = \hat{x}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(n_x + k)P_{k-1|k-1}}) \quad i=n_x, \dots, 2n_x \quad (59-2)$$

که در اینجا نیز k پارامتر ثابتی است بطوریکه $k+n \neq 0$ و $\sqrt{(n+k)P_{k-1|k-1}}$ ، i امین ستون ماتریس حاصله از ریشه دوم ماتریس $(n_s + k)P_{k-1|k-1}$ می باشد. وزن های W_{k-1}^i ، نرمالیزه شده هستند بطوریکه $\sum_{i=1}^{2n_a} w_i = 1$.

مرحله پیش بینی :

$n_x + 1$ نمونه از تابع غیرخطی f_{k-1} عبور کرده و $n_x + 1$ نمونه جدید بدست آمده تابع چگالی $P(x_k | Z_{k-1})$ را بفرم گوسی توصیف و تقریب می زنند.

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n_s} w_{k-1}^i f_{k-1}(x_{k-1}^i) \quad (۶۰-۲)$$

$$(۶۱-۲)$$

$$P_{k|k-1} = Q_k + \sum_{i=0}^{2n_s} w_{k-1}^i (f_{k-1}(x_{k-1}^i) - \hat{x}_{k|k-1})(f_{k-1}(x_{k-1}^i) - \hat{x}_{k|k-1})^T$$

و تخمین داده اندازه گیری بفرم زیر است :

$$\hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n_s} w_{k-1}^i h_k(x_{k|k-1}^i) \quad (۶۲-۲)$$

$$x_{k|k-1}^i = f_{k-1}(x_{k-1}^i) \quad \text{بطوریکه}$$

مرحله به روزرسانی :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \quad (۶۳-۲)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k S_k K_k^T \quad (۶۴-۲)$$

بطوریکه

$$K_k = P_{xz} K S_k^{-1} \quad (۶۵-۲)$$

$$S_k = R_k + P_{zz} \quad (۶۶-۲)$$

$$P_{xz} = \sum_{i=0}^{2n_s} w_{k-1}^i (x_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1}) (h_k(x_{k|k-1}^i) - \hat{z}_{k|k-1})^T \quad (۶۷-۲)$$

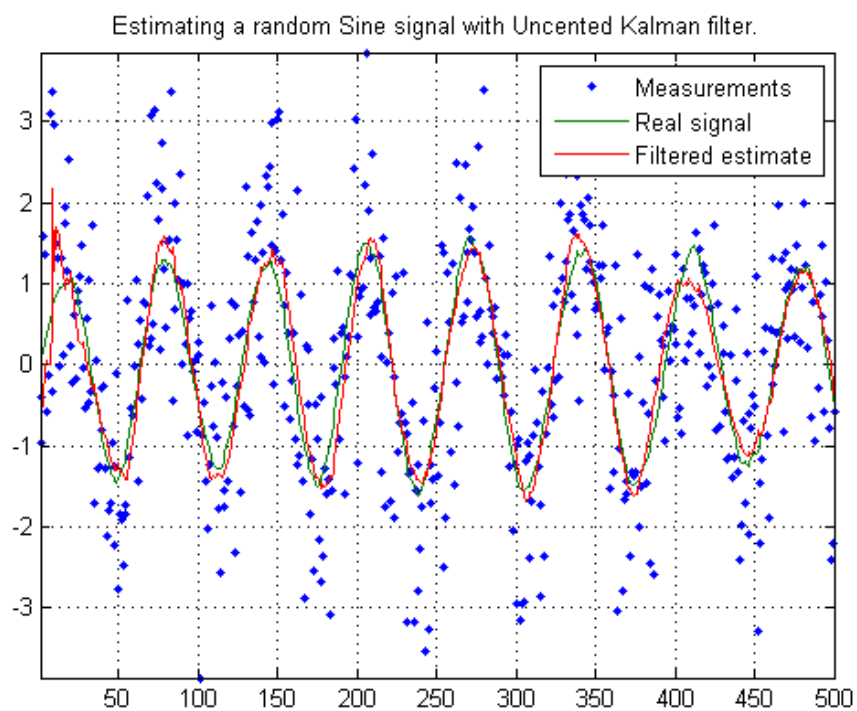
$$P_{zz} = \sum_{i=0}^{2n_s} h_k(x_{k|k-1}^i - \hat{z}_{k|k-1}) (h_k(x_{k|k-1}^i) - \hat{z}_{k|k-1})^T \quad (۶۸-۲)$$

قابل ذکر است که میانگین و کواریانس بدست آمده با استفاده از عملیات استاندارد بردارها و ماتریسها قابل محاسبه و نیازی به بدست آوردن ماتریس ژاکوبین و استفاده از آن همانند آنچه در EKF است، نمی باشد. اما بطور کلی از نظر پیچیدگی محاسباتی، UKF شبیه EKF است. [۲۳]

۲-۶) شبیه سازی صافی کالمن بی رد

۲-۶-۱) ردگیری سیگنال سینوسی

در این قسمت با استفاده از روابط بخش (۲-۳-۱) سیگنال سینوسی را با استفاده از UKF شبیه سازی می کنیم



شکل ۲-۷ تخمین سیگنال سینوسی با استفاده UKF

جدول ۲-۱ مقایسه MSE در دو روش UKF و EKF

Method	MSE θ	MSE ω	MSE a
EKF (مرتبه اول)	0.85	0.67	0.74
EKF (مرتبه دوم)	0.76	0.63	0.57
UKF	0.64	0.54	0.49

با مقایسه مقدار خطا، همانطور که می‌بینید روش UKF مناسب تر بوده و مقدار خطای کمتری دارد

۲-۷) صافی کالمن بی رد افزوده^{۲۶}

تبدیل غیر خطی درجه با نویز جمع شونده را در نظر بگیرید

$$Y = f(x) + w \quad (۲-۶۹)$$

²⁶ Augmented uncented kalman filter

در اینجا X متغیر تصادفی n بعدی با میانگین $\bar{x}$ و کواریانس p_x و w نویز میانگین صفر m بعدی با کواریانس Q و ناهمسته با x می باشد در حالت عادی مسئله ما پیدا کردن میانگین $\bar{y}$ و کواریانس p_y می باشد. معادله بالا را می توانیم به صورت زیر باز نویسی کنیم. [۲۴]

$$y^a = f^a(x^a) \quad (۷۰-۲)$$

که در اینجا بردار تصادفی به صورت مقابل است

$$X^a = [x^T \quad w^T]^T \quad (۷۱-۲)$$

و تبدیل غیر خطی جدید به صورت زیر تعریف می شود

$$f^a(x^a) = f^a([x^T \quad w^T]^T) = f(x) + w \quad (۷۲-۲)$$

در اینجا X^a با $2L+1$ (l=n+w+v) نقطه سیگمای متقارن تخمین زده می شود

$$x_0 = \hat{x} \quad (۷۳-۲)$$

$$x_i = \hat{x} + (\sqrt{(n+k)P_x})_i \quad (۷۴-۲)$$

$$x_{i+n} = \hat{x} - (\sqrt{(n+k)P_x})_i \quad (۷۵-۲)$$

$$W_0 = k/(n+k) \quad (۷۶-۲)$$

$$W_i = k/2(n+k) \quad (۷۷-۲)$$

$$W_{i+n} = k/2(n+k) \quad (۷۸-۲)$$

W_i وزن همراه با i امین نقطه سیگما می باشد. k پارامتر مقیاس بندی می باشد که اغلب بین 0 تا $3-n$ در نظر گرفته می شود اگر k برابر 0 در نظر گرفته شود وزن ها و نقاط سیگما با n در نظر گرفته می شود.

تابع تبدیل را در نظر بگیرید

$$y_i = f(x_i) \quad (۷۹-۲)$$

مقدار $\hat{y}$ به وسیله میانگین وزن های نقاط تبدیل محاسبه می شود

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^{2n} W_i \gamma_i \quad (۸۰-۲)$$

رابطه کواریانس p_y به صورت زیر می باشد.

$$P_y = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\gamma_i - \hat{y})(\gamma_i - \hat{y})^T + Q \quad (۸۱-۲)$$

۲-۷-۱) تبدیل Augmented UT :

بردار تصادفی افزوده x^a به وسیله $2(n+m)+1$ نقطه سیگمای متقارن تقریب زده می شود

$$x_0^a = \hat{x}^a \quad i=0 \quad (۸۲-۲)$$

$$x_i^a = \hat{x}^a + (\sqrt{(L+k^a)P_{x^a}})_i \quad i=1, \dots, L \quad (۸۳-۲)$$

$$x_{i+L}^a = \hat{x}^a - (\sqrt{(L + k^a)P_{x^a}})_i \quad i=1, \dots, L \quad (۸۴-۲)$$

$$W_0^a = k^a / (n + m + k^a) \quad i=0 \quad (۸۵-۲)$$

$$W_i^a = 1/2(n + m + k^a) \quad i=1, \dots, L \quad (۸۶-۲)$$

$$W_{i+n+m}^a = 1/2(n + m + k^a) \quad i=1, \dots, L \quad (۸۷-۲)$$

در اینجا وزن W_i^a و اسکالر k^a همتای w_i و k می باشند.

معادله پیش بینی

$$x_i^k(k+1|k) = f^a(k, x_i^k(k), x_i^w(k)) \quad i=0, \dots, 2L \quad (۸۸-۲)$$

$$\hat{x}^a(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2L} W_i^a x_i^x(k+1|k) \quad (۸۹-۲)$$

$$\Delta x_i^a(k+1|k) = x_i^x(k+1|k) - \hat{x}^a(k+1|k) \quad (۹۰-۲)$$

$$P_{x^a(k+1|k)} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^a x_i^a(k+1|k) (x_i^a(k+1|k))^T \quad (۹۱-۲)$$

$$\xi_i^a(k+1) = h^a(k+1, x_i^k(k+1|k), x_i^v(k)) \quad (۹۲-۲)$$

$$\hat{Z}^a(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2L} W_i \xi_i^a(k+1) \quad (۹۳-۲)$$

$$\Delta \xi_i^a(k+1) = \xi_i^a(k+1) - \hat{Z}^a(k+1|k) \quad (۹۴-۲)$$

$$P_{z^a} = \sum_{i=0}^{2L} W_i \Delta \xi_i^a(k+1) (\Delta \xi_i^a(k+1))^T \quad (۹۵-۲)$$

$$P_{x^a z^a} = \sum_{i=0}^{2L} W_i \Delta x_i^a(k+1) (\Delta \xi_i^a(k+1))^T \quad (۹۶-۲)$$

معادله به روز رسانی

$$K^a(k+1) = P_{x^a z^a} P_{z^a}^{-1} \quad (97-2)$$

$$\Delta Z^a(k+1) = Z(k+1) - \hat{Z}^a(k+1|) \quad (98-2)$$

$$\hat{x}^a(k+1) = \hat{x}^a(k+1|k) + K^a(k+1) \Delta Z^a(k+1) \quad (99-2)$$

$$P_{x^a(k+1)} = P_{x^a(k+1|k)} - K^a(k+1) P_{z^a} K^a(k+1)^T \quad (100-2)$$

۲-۸) عوامل کاهش دهنده عملکرد ردیابی صافی کالمن

به طور کلی می توان عوامل کاهش دهنده عملکرد ردیابی را در شرایط عملی بصورت زیر برشمرد.

۱. همانطور که می دانیم صافی کالمن در شرایط خاصی که معادلات سیستم و اندازه گیری خطی باشند و نویز جمع شونده در این معادلات گوسی باشد، بهینه می باشد. در حالت کلی در مسئله ردیابی اهداف ، معادلات دینامیک در فضای کارتزین توصیف می شوند در حالیکه داده های دریافت شده توسط سونار و رادار در فضای کروی بیان می گردند، هر یک از دسته معادلات دینامیک و دسته معادلات اندازه گیری در فضای توصیف شده

خود خطی محسوب می‌شوند. اما بمنظور پیاده نمودن هریک از الگوریتم‌های ردیابی برای تخمین متغیرهای حالت (موقعیت، سرعت و شتاب هدف) لازم است تا هر دو دسته معادلات دینامیک و اندازه‌گیری در یک فضا توصیف شوند. تبدیل هر دسته از این معادلات از فضای مربوطه به فضای دیگر، باعث ایجاد دسته معادلات غیرخطی می‌شود.

۲. مانور هدف: چنانکه دیدیم هر صافی کالمن تنها یک معادله دینامیکی دارد که برای ردیابی مناسب لازم است تا به دینامیک هدف نزدیک باشد. هدف در مدت زمان ردیابی بسته به شرایط مختلف در هر لحظه انواع حرکت را از خود بروز می‌دهد، لذا بسته به نوع حرکت دینامیک واقعی هدف تغییر ایجاد می‌کند. پس سیستم ردیاب با یک تابع دینامیکی نمی‌توان انطباق مناسبی با دینامیک هدف ایجاد کند و این مسئله باعث کاهش عملکرد سیستم ردیاب می‌شود.

۳. نویز مشاهده غیرگوسی Glint: از جمله فرضیات بهینه ماندن صافی کالمن، گوسی بودن نویزهای حالت و مشاهده می‌باشد. غیر گوسی بودن نویز مشاهده عملکرد سیستم ردیابی را کاهش می‌دهد. در صورتی که چگالی نویز غیرگوسی دنباله سنگین یا دنباله طولانی باشد تنزل عملکرد صافی کالمن بشدت و به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد، بطوریکه امکان گم شدن هدف وجود دارد. در ردیابی هدف سیمای هدف از دید رادار تغییر می‌کند. این مسئله باعث می‌شود تا مرکز انعکاس آشکار سونار شدیداً دچار سرگردانی شود. در این حالت نویز مشاهدات رفتاری غیرگوسی از خود بروز داده که این رفتار غیرگوسی دارای چگالی دنباله سنگین می‌باشد که آن را نویز Glint می‌نامند. دنباله سنگین بودن نویز همراه با داده‌های عملی رادار ایجاد ضربه‌های شدید می‌کند. این ضربه‌ها عملکرد صافی کالمن را کاهش می‌دهد. لذا صافی کالمن در مواجهه با این ضربه‌ها شدیداً دچار خطا می‌شود و عملکرد ردیابی به شدت کاهش می‌یابد. Glint تولید شده بوسیله اهداف کوچک در فواصل دور قابل چشم پوشی است. اما وقتی ردیابی یک هدف بزرگ در برد کوتاه در حال انجام باشد، Glint در

کاهش دقت ردیابی دقت ردیابی بسیار موثر می‌باشد. بنابراین در اصل با توجه به وجود این نویز ، با مسئله صافی کردن غیرگوسی مواجه هستیم.[۲۶]

۴. نویز مشاهده رنگی : چنانچه متذکر شدیم در ردیابی اهداف از داده‌های نویزی سونار استفاده می‌شود. همانطور که در معادلات کالمن دیدیم نویز اندازه‌گیری معمولاً سفید در نظر گرفته می‌شود. یعنی فرض می‌شود که انرژی نویز در تمام فرکانس‌ها بطور یکنواخت توزیع شده است. اما در عمل اینچنین نویزی وجود ندارد و همه نویزها دارای یک باند فرکانسی هستند که تمام فرکانس‌ها را شامل نمی‌شود و بیشتر انرژی نویز در این باند متمرکز است. اینچنین فرضی به واقعیت نزدیکتر می‌باشد. در این صورت نویز موجود در سنجش رادار و سونار دیگر سفید نیست و به آن نویز رنگی گفته می‌شود. رنگی بودن نویز باعث کاهش عملکرد سیستم ردیاب می‌شود و صافی کالمن از حالت بهینه خارج می‌شود، چرا که صافی کالمن با فرض نویز سفید یک صافی بهینه می‌باشد. همبستگی بین نمونه‌ها به پیوند نمونه برداری بستگی دارد، با افزایش آن همبستگی بین نمونه‌ها نویز رفته رفته کاهش می‌یابد و به صفر نزدیک می‌شود. در رادارها و سونارهای با فرکانس سنجش پایین به خاطر وجود خاصیت فوق با تقریب خوب نمونه‌های نویز مستقل از هم فرض می‌شوند. اما در سیستم‌های ردیابی پیشرفته که زمان نمونه‌برداری در حد صدم ثانیه می‌باشد. دیگر نمی‌شود از همبستگی بین نمونه‌ها صرف‌نظر کرد، چرا که این مسئله باعث کاهش عملکرد سیستم ردیاب می‌شود.[۲۸]

۲-۹ خلاصه

در این فصل به بررسی انواع روش‌های تخمین پرداختیم. در ابتدا صافی کالمن خطی معرفی شد. این صافی توسط کالمن معرفی شد ولی کاربرد آن برای سیستم‌های خطی بود و سیستم‌های غیرخطی را جوابگو نبود. به همین علت صافی کالمن توسعه یافته معرفی شد که در این فصل به صورت مفصل بررسی گردید. این صافی از کالمن خطی قابل قبول‌تر بود اما برای سیستم‌هایی که غیر خطی بودن آن‌ها کم می‌باشد مناسب

است. به همین خاطر صافی کالمن بی‌رد معرفی گردید این صافی برای سیستم‌های غیرخطی مناسب می‌باشد. در ادامه صافی کالمن بی‌رد پیشرفته شرح داده شد. در صافی کالمن بی‌رد اگر نویز را جمع شونده و در تابع سیستم در نظر بگیریم با خطای کمتری در تخمین مواجه می‌شویم.

فصل سوم

ردیابی اهداف زیرآب

۳-۱) مقدمه

ردیابی هدف یکی از مهمترین قسمت های بسیاری از سیستم های نظارت و راهبری است ، که کار آن می تواند تعیین تعداد ، مکان و خصوصیات هدف باشد. به طور کلی کار سیستم ردیاب استخراج اطلاعات دقیق مربوط به اهداف ، از روی داده های نویزی غیردقیق می باشد. این موضوع به نوعی همان مفهوم صافی کردن است. روند به این صورت است که پس از اعلام وجود هدف در واحد پردازش سیگنال ، داده های مورد نیاز سیستم ردیاب از سیگنال های نویزی استخراج شده، به سیستم ردیاب منتقل می شود. مهمترین قسمت سیستم ردیاب ، صافی ردیاب است. که فصل قبل انواع روش های صافی کردن را شرح دادیم.

مسئله ردیابی هدف شامل معادلات دینامیکی و مشاهدات است. در ردیابی ، هدف این است که با در اختیار داشتن داده ها از واحد پردازش سیگنال ، از طریق روابط بازگشتی بردار حالت مربوط به هدف تخمین زده شود.

حل این مسئله به مسئله فیلترینگ منجر می شود. مشهورترین صافی های مورد استفاده در مسائل تخمین ، با توجه به نوع معادلات و نوع نویز در مسئله عبارتند از : صافی کالمن ، صافی کالمن تعمیم یافته ، صافی کالمن بی رد ، صافی ذره ای و ...

هدف این فصل ارائه یک تصویر کلی از سیستم های ردیابی می باشد. به این منظور ابتدا وظایف سیستم ردیابی مطرح خواهد شد ، سپس با ارائه نمای کلی یک سیستم ردیابی ، بخش های مختلف آن به اختصار توضیح داده خواهند شد. در پایان نیز مدل ردیابی به اختصار شرح داده خواهد شد.

۳-۲) وظایف بخش ردیابی

در این قسمت به طور خلاصه به قابلیت های مورد نظر یک سیستم ردیابی پرداخته می شود. یک سیستم ردیابی باید قابلیت ردیابی هدف با استفاده از مشاهدات دریافتی از حس گر مربوط را دارا باشد. به بیان دیگر چنین سیستمی باید قادر به انجام تخمینی مناسب از حالت اهداف موجود در ناحیه مورد مراقبت و در صورت امکان محاسبه دقیق این تخمین ها باشد. این عمل بایستی تحت شرایط و محدودیت های زیر انجام پذیرد :

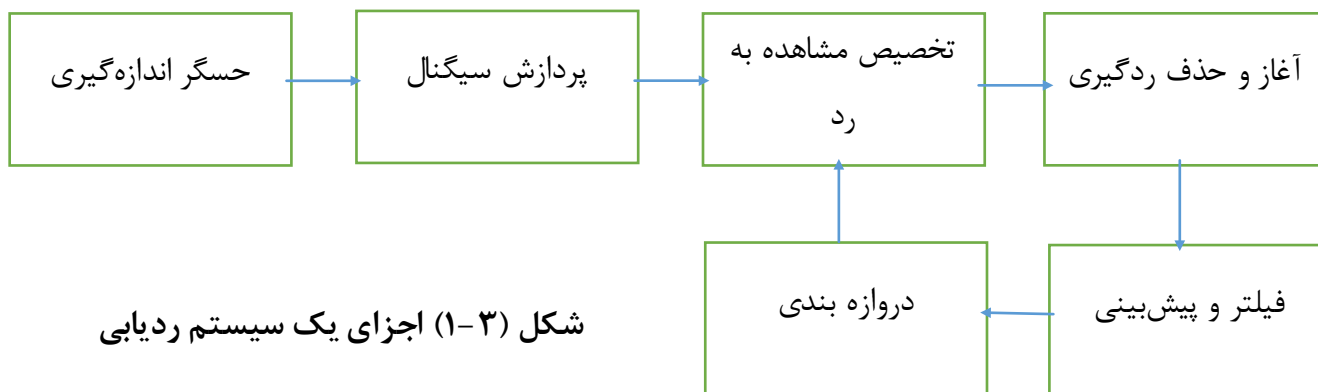
۳-۲-۱) عدم قطعیت در حرکت هدف

معمولا حرکت هدف تحت تاثیر اختلالات تصادفی و بعضا مانورهای تعمدی نامشخص و غیرقابل پیش بینی برای بخش ردیابی قرار دارند. از اینرو انتخاب مدل مناسب برای حرکت هدف و نحوه مدل سازی آن ، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

۳-۲-۲) مشخص نبودن منشاء مشاهدات حسگر

یکی از مشکلات حاد سیستم‌های ردیابی مشخص نبودن منشاء هرکدام از مشاهدات گزارش شده توسط حسگر می باشد که از مهمترین عوامل ایجاد این شرایط می توان به وجود هشدارهای غلط در سیستم‌های آشکارسازی، کلاتر ناشی از انعکاس از اهداف مجازی موجود در ناحیه مراقبت اشاره کرد.

۳-۳) اجزای یک سیستم ردیابی



شکل (۳-۱) نمای کلی یک سیستم ردیابی را نشان می دهد. اگرچه بعضا تداخل فعالیت بین بخش های مختلف شکل فوق وجود دارد، اما در مجموع تقسیم بندی ارائه شده قابل قبول است. در اینجا پردازش اطلاعات به

صورت بازگشتی صورت می گیرد. بنابراین فرض بر این است که قبل از دریافت مشاهدات یک اسکن ردی برای هدف موجود در اسکن های قبل تشکیل شده باشد.

اطلاعات جمع آوری شده حسگر در اسکن جاری ابتدا وارد بخش آشکارسازی و پردازش سیگنال می شوند. در این قسمت با انجام پردازش های لازم بر روی اطلاعات دریافتی ، آن ها را به صورت قابل استفاده برای بخش ردیابی (به طور مثال زاویه) در می آورند. خروجی های بخش پردازش سیگنال که مجموعه ای از مشاهدات گزارش شده توسط رادار به عنوان موقعیت هدف در ناحیه مراقبت است ، برای تخصیص به رد موجود استفاده می شوند. به این ترتیب که نخست با بررسی شرط دروازه برای هر مشاهده ، همبستگی های ممکن بین سنجش های حسگر و رد تایید شده موجود مشخص می شوند، سپس با الگوریتم های پیچیده تر تصمیم نهایی در مورد نحوه اختصاص مشاهدات به رد موجود اتخاذ می گردد. در ادامه مشاهداتی که دارای معیارهای لازم برای ادامه ردیابی نیستند از لیست مشاهدات مربوط به رد موجود حذف می شوند. در نهایت براساس مشاهده تخصیص داده شده به رد موجود، تخمین حالت فعلی آن ها و همچنین پیش بینی این حالت ها برای گام بعدی با استفاده از روش های تخمین مناسب صورت می پذیرد.

۳-۴) ردیابی اهداف زیر آب

ردیابی هدف، یک نیاز ضروری جهت سیستم های نظارت و مراقبت است. در این سیستم ها عموماً از یک یا چند حسگر و نیز زیر سیستم های کامپیوتری استفاده می شود. از جمله سیستم های نظارت و مراقبت می توان به سیستم های رادار و سونار اشاره کرد. در این سیستم ها اندازه گیری ها از طریق منابع گوناگونی همچون انعکاس بازگشتی از اهداف با توجه به قوت آن ها، نویز زمینه و منابعی همچون نویز حرارتی انجام می شود. در واقع هدف اصلی ردیابی اهداف، ابتدا جمع نمودن داده های دریافتی از حسگرها که شامل یک یا چند هدف بالقوه است، می باشد. پس از این مرحله این داده ها درون مجموعه ای از مشاهدات، طبقه بندی شده و بعد از آن که نویزهای

پیش‌زمینه و دیگر اهداف اشتباهی حذف شدند، اهداف تخمین زده شده و کوانتیزه می‌گردند و نهایتاً اطلاعاتی مانند سرعت هدف، موقعیت پیش‌بینی شده آینده و نیز مشخصات طبقه‌بندی هدف محاسبه و ثبت خواهد شد.

۳-۵) مدل سازی دینامیک حرکت هدف

ماهیت هر مدل توسط معادلات حالت و مشاهدات بیان می‌شود. مدل سیستم و همچنین معادله اندازه‌گیری را بصورت زیر در نظر می‌گیریم [17]

$$X(K) = F X(k-1) + U(k) \quad (۱-۳)$$

$$Z(k) = \text{Arctan}\left(\frac{x_1(k)}{x_2(k)}\right) + W(k) \quad (۲-۳)$$

که $U(k)$ و $W(k)$ فرآیندهای تصادفی دارای توزیع مستقل یکسان گوسی با میانگین صفر که به ترتیب با ماتریس کواریانس $Q(k)$ و $R(k)$ بوده و نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری را مدل می‌کنند.

همانطور که مشاهده می‌شود معادلات حالت خطی و معادله اندازه‌گیری غیرخطی می‌باشد. از آن جا که معادله اندازه‌گیری سیستم غیرخطی می‌باشد به دنبال روش هایی می‌باشیم که با استفاده از تقریب‌های خطی مشکل غیرخطی بودن معادله اندازه‌گیری سیستم را حل نمایند و بتوانیم تخمینی از بردار حالت سیستم داشته باشیم. روش های مختلفی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته که می‌توان از فیلتر کالمن EKF، فیلتر کالمن UKF، فیلتر کالمن گوسی - هرمیت و روش های دیگر نام برد. که در فصل پیش به بررسی و مقایسه این تخمینگر ها پرداختیم.

۳-۵-۱) بررسی مدل ردگیری هدف در فضای کارترین

همانطور که در شکل (۲-۱) می‌بینید مدل هدف یک حرکت نسبی تقریباً خطی را دارد که برای مدل سیستم در فضای کارترین با سرعت ثابت و معادله گسسته زمان داریم :

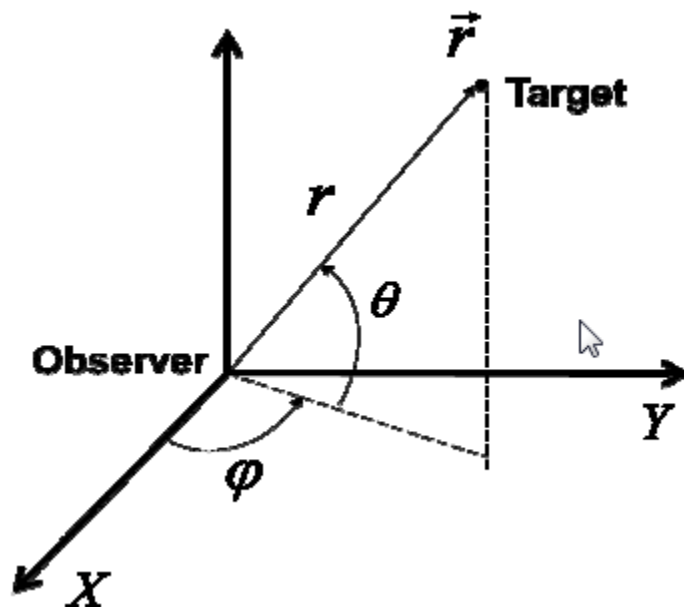
$$x_{k+1}^{car} = F_k x_k^{car} + G_k W_k \quad (3-3)$$

$$x_{k+1}^{car} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_k^{car} + \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} W_k \quad (4-3)$$

همانطور که مشاهده می کنید معادله حالت خطی می باشد و معادله اندازه گیری به صورت زیر مدل می شود

$$Z_k = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right) \\ \arctan\left(\frac{-x_3}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

در معادله 5-3 مشاهده می کنید که معادله اندازه گیری به شدت غیر خطی می باشد.



شکل ۲-۳ موقعیت هدف و حسگر در فضای سه بعدی و زوایای آن

همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید ϕ زاویه نسبت به بردار Z و یا زاویه عمودی هدف می‌باشد و θ زاویه نسبت به بردار X و Y و یا به عبارتی زاویه افقی هدف است. بردار هدف را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$X_t(K) = [S_t(K), Y_t(K), Z_t(K), V_{tx}(K), V_{ty}(K), V_{tz}(K)]^T \quad (۶-۳)$$

که در رابطه شماره (۶-۳) $S_t(K), Y_t(K), Z_t(K)$ به ترتیب موقعیت هدف در راستای محور X ها، Y ها و Z ها است و $V_{TX}(K), V_{TY}(K), V_{TZ}(K)$ به ترتیب سرعت هدف در راستای محور X ها، Y ها و Z ها می‌باشد.

همچنین بردار حالت حسگرها را به صورت زیر مفروض باشد.

$$X_o(K) = [S_o(K), Y_o(K), Z_o(K), V_{ox}(K), V_{oy}(K), V_{oz}(K)]^T \quad (۷-۳)$$

$S_0(K), Y_0(K), Z_0(K)$ موقعیت حسگر در راستای محور X ها، Y ها و Z ها است و $V_{OX}(K), V_{OY}(K), V_{OZ}(K)$ به

ترتیب سرعت حسگر در راستای محور X ها، Y ها و Z ها می باشد.

$$\theta_1(K) = \tan^{-1} \frac{Y_t(K) - Y_{O1}(K)}{S_t(K) - S_{O1}(K)} = \tan^{-1} \frac{R_{Y1}(K)}{R_{X1}(K)} \quad (1-)$$

۳)

$$\theta_2(K) = \tan^{-1} \frac{Y_t(K) - Y_{O2}(K)}{S_t(K) - S_{O2}(K)} = \tan^{-1} \frac{R_{Y2}(K)}{R_{X2}(K)} \quad (2-)$$

۳)

$$\varphi_1(K) = \tan^{-1} \frac{Z_T(K) - Z_{O1}(K)}{\sqrt{(S_t(K) - S_{O1}(K))^2 - (Y_t(K) - Y_{O1}(K))^2}} = \tan^{-1} \frac{R_{Z1}(K)}{\sqrt{(R_{X1}(K))^2 - (R_{Y1}(K))^2}} \quad (3-1)$$

$$\varphi_2(K) = \tan^{-1} \frac{Z_T(K) - Z_{O2}(K)}{\sqrt{(S_t(K) - S_{O2}(K))^2 - (Y_t(K) - Y_{O2}(K))^2}} = \tan^{-1} \frac{R_{Z2}(K)}{\sqrt{(R_{X2}(K))^2 - (R_{Y2}(K))^2}} \quad (3-2)$$

که در روابط بالا $R_X(K), R_Y(K), R_Z(K)$ به ترتیب برد هدف در راستای محور X ها، Y ها و Z ها است

$$X(k) = F(X(k-1)) + W(k-1) \quad (12-)$$

۳)

$$Z(k) = h(X(k)) + V(k) \quad (13-)$$

۳)

$$X(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T(k-1) \\ Y_T(k-1) \\ Z_T(k-1) \\ V_{TX}(k-1) \\ V_{TY}(k-1) \\ V_{TZ}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} WX_T(k-1) \\ WY_T(k-1) \\ WZ_T(k-1) \\ WV_{TX}(k-1) \\ WV_{TY}(k-1) \\ WV_{TZ}(k-1) \end{bmatrix} \quad (14-)$$

۳)

$$Z_K = \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \varphi_1(k) \\ \theta_2(k) \\ \varphi_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \\ V_3(k) \\ V_4(k) \end{bmatrix} \quad (15-)$$

۳)

با توجه به فرض ثابت بودن، سرعت هدف متحرک معادله ۳-۱۴ به صورت بالا بدست آمده است و بردار W نویز فرآیند راستاهای مختلف حرکتی است و Δt فاصله نمونه برداری می باشد. همچنین V بردار نویز اندازه گیری است.

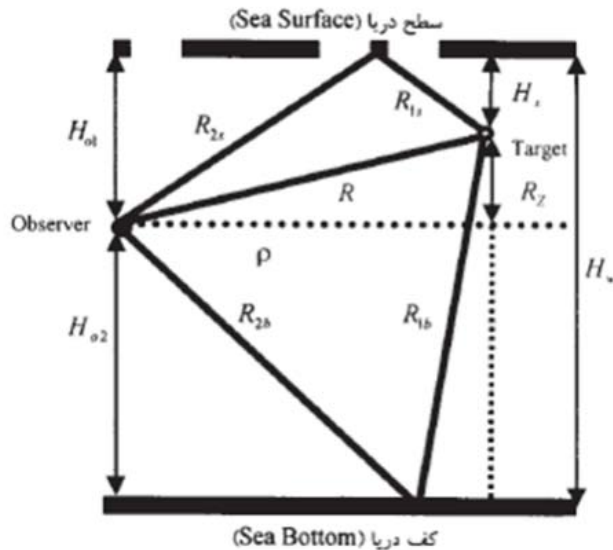
۳-۶) ردیابی هدف با استفاده از انعکاس^{۲۷}

ردیابی غیر فعال ، به تعقیب یک هدف بدون ارسال سیگنال از سوی ردیاب در محیط زیر آب اطلاق می شود . در این روش بدون ارسال سیگنالی در محیط و تنها از طریق پردازش سیگنالهای آکوستیکی دریافتی توسط حسگرهای سیستم که عمدتاً به نویز محیط آلوده می باشد ، ردیابی اهداف انجام می شود . سیستم ردیاب

²⁷ reflection

غیرفعال با توجه به عدم ارسال سیگنال در محیط ، توسط عوامل دشمن قابل کشف نخواهد بود و این مساله حائز اهمیت است . اصولا ردیابی زیر آب برای پیش بینی مسیر هدف و جلوگیری از تداخل و اشتباه شدن اهداف با یکدیگر و در پاره ای موارد برای پیش بینی مسیر هدف و جلوگیری از تداخل و اشتباه شدن اهداف با یکدیگر و در پاره ای موارد برای پیش بینی کوتاه ترین فاصله هدف تا سیستم ردیاب و یا کوتاه ترین زمانی که هدف به کوتاه ترین فاصله می رسد ، به کار می رود . بدیهی است با توجه به سرعت کم انتشار امواج آکوستیکی زیر آب (۱۵۰۰ متر بر ثانیه) قابلیت پیشگویی و تخمین مسیر حرکت هدف و یا سایر مشخصات مربوط (از جمله سرعت و ...) حائز اهمیت می باشد .

برای مدل کردن انتشار امواج آکوستیکی در محیط زیرآب از تئوری ها و روش های مختلفی استفاده می شود از مهمترین این روش ها ، روش تئوری پرتویی می باشد . در این روش ، امواج آکوستیکی منتشر شده در آب به شکل پرتو مدل شده و بدین ترتیب برخورد پرتو در نظر گرفته شده و سطح و کف دریا مثل آینه عمل می کنند . در این روش امواج آکوستیکی مدل شده با پرتو ، با دامنه و فازهای مختلف (تاخیر های مختلف) به حسگر می رسند شکل ۱ ساختار هندسی سیگنالهای ساطع شده از هدف زیرآب از مسیرهای مستقیم و انعکاس از سطح و کف دریا را با توجه به تئوری پرتویی نشان می دهد.



شکل ۳-۳ ساختار هندسی انعکاس کف و سطح

در شکل بالا موقعیت حسگر (observer) وهدف به ترتیب با دایره های توپر و توخالی نشان داده شده اند. H_w عمق آب H_{o1} عمق حسگر نسبت به سطح دریا ، H_{o2} عمق حسگر نسبت به کف دریا ، H_s عمق هدف نسبت به سطح دریا ، R برد هدف (فاصله مستقیم هدف تا حسگر) وبعبارتی مسیر انعکاس مستقیم R_z برد عمقی هدف (تفاوت عمق حسگر وهدف نسبت به سطح آب)، ρ برد شعاعی هدف ، R_{1s} و R_{2s} مسیر پرتو انعکاس از سطح دریا R_{1b} و R_{2b} مسیر پرتو انعکاس از کف دریا می باشد.

همچنین شکل پایین موقعیت هدف و حسگر را از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل می کند. که برد کلی هدف R برد شعاعی هدف ρ ، برد عمقی هدف R_z ، برد در راستای محور X R_x و برد راستای محور Y R_y را در صفحه مختصات دکارتی رسم شده است.

روابطی که از موقعیت هندسی هدف و حسگر به دست می آید به صورت زیر است

$$R_x = \rho \cos \theta \quad (۱۶-۳)$$

$$R_y = \rho \sin \theta \quad (۱۷-۳)$$

$$\rho^2 = R^2 - R_z^2 \quad (۱۸-۳)$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad (۱۹-۳)$$

$$\tau_1(k) = \frac{\sqrt{(R^2 + 4H_{01}^2 - 4R_z H_{01})} - R}{C} \quad (۲۰-۳)$$

$$\tau_2(k) = \frac{\sqrt{(R^2 + 4H_{02}^2 + 4R_z H_{02})} - R}{C} \quad (۲۱-۳)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1} \frac{R_x(k)}{R_y(k)} \quad (۲۲-۳)$$

برای تعیین مدل فضای حالت سیستم ردیابی بردار حالت، شامل برد و سرعت هدف متحرک در راستاهای مختلف مختصات دکارتی می باشد و بردار اندازه گیری اختلاف زمانی رسیدن سیگنال از مسیر مستقیم مسیر انعکاس سطح و مسیر انعکاس کف آب می باشد. به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$X_k = (X_k \ y_k \ \dot{X}_k \ \dot{y}_k)^T \quad (۲۳-۳)$$

$$X_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \dot{X}_{k-1} \\ \dot{y}_{k-1} \end{pmatrix} + q_{k-1} \quad (۲۴-۳)$$

بردار اندازه‌گیری در این سیستم برابر تاخیر های زمانی دریافت سیگنالهای اکوستیکی از انعکاس سطح و کف دریا نسبت به مسیر مستقیم بصورت زیر می باشد:

$$Z(k) = G(k) + V(k) = \begin{bmatrix} \tau_1(k) \\ \tau_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix} \quad (۲۵-۳)$$

در این فصل به بررسی مدل ردیابی هدف با استفاده از زاویه پرداختیم که اولین گام ایجاد یک مدل است که بیان کننده رابطه بیان حالات هدف و اندازه‌گیری حسگرها باشد. ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال شامل حسگرهای تعبیه شده ثابت در عمق مورد نظر و یک هدف متحرک ساطع کننده سیگنالهای آکوستیکی است. برای مدل کردن امواج آکوستیکی از روش نظریه پرتو استفاده شده است.

فصل چهارم

ترکیب اطلاعات و جاییابی حسگرها

۴-۱) ترکیب اطلاعات

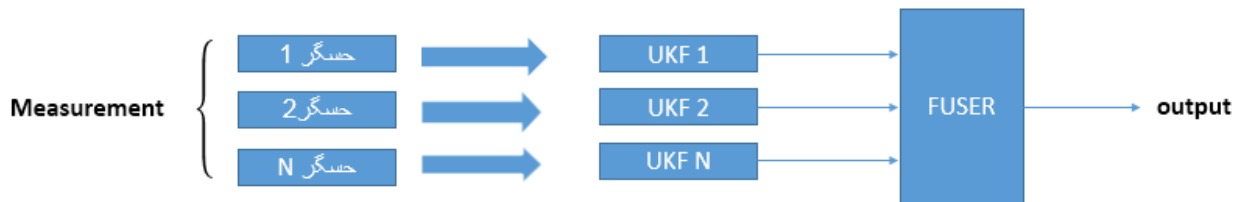
رشد و توسعه سیستم های اطلاعات چند منبعی مقرون به صرفه ، برای اختصاص دادن پردازش ترکیب داده ها به روش استاندارد نیاز دارد. در سال های اخیر استفاده از تکنیک های ترکیب داده در کاربردهای نظامی و غیرنظامی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. ترکیب داده های مختلف و یا سنسورهای متعدد باعث می شود تا مزایای کیفی و کمی را توأمان داشته باشیم و پایداری عملکرد فرایند افزایش یابد. به عنوان مثال می توان از چندین سنسور معمولی و ارزان به جای یک سنسور پیچیده استفاده کرد که این خود باعث کاهش هزینه ها نیز می شود.

ترکیب اطلاعات ، فرایندی است که با پیوستگی، همبستگی و ترکیب اطلاعات از منابع متعدد سر و کار دارد تا به یک وضعیت بهتر ، تخمین های یکسان ، تشخیص کامل و فوری وضعیت های بحرانی و تعیین شرایط خطر برسیم. ترکیب اطلاعات سنسورهای مختلف نیز کار جمع آوری و استخراج اطلاعات مطلوب و مفیدی که از دو یا تعداد بیشتری حسگر بدست می آیند را به عهده دارد و باعث افزایش اطمینان، پوشش فضایی – زمانی ، کاهش ابهامات و بهبود آشکارسازی در فرآیندهای مرتبط می شود.

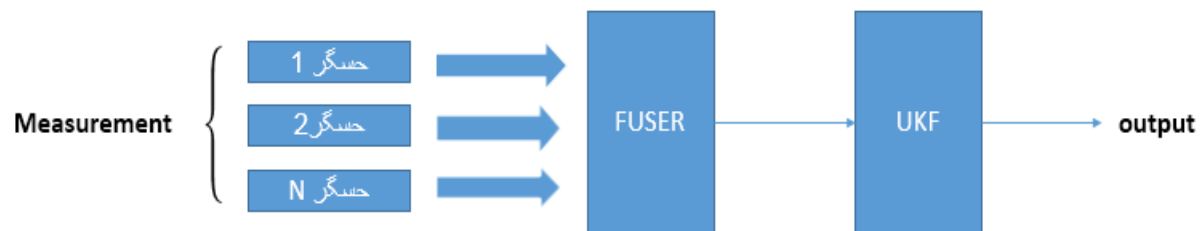
روش های مختلفی برای ترکیب داده وجود دارد که بر حسب مشخصات ورودی و خروجی فرآیند متفاوت است ، از جمله این روش ها می توان به فنون صافی کالمن، شبکه عصبی ، منطق فازی ، الگوریتم ژنتیک ، تخمین گر بیزین و روش های پردازش سیگنال اشاره کرد. یکی از مهمترین و کاربردی ترین این روش ها استفاده از فیلتر کالمن است که در واقع مجموعه ای از معادلات ریاضی برای تهیه تخمین موثر حالت یک فرایند می باشد.

۴-۲) ترکیب داده های چندین سنسور بر مبنای صافی کالمن

ترکیب اطلاعات سنسورها ، با جمع کردن و استخراج داده های بدست آمده از چندین سنسور سروکار دارند. در این فرایند ، داده های سنسورهای مختلف ، باید با هم ترکیب شوند تا به اطلاعات دقیق تری و کامل تری برسیم در میان تکنیک های مختلف برای این امر، الگوریتم صافی کالمن یکی از مهمترین آن هاست . صافی کالمن یک الگوریتم بسیار موثر را تهیه می کند و برای فرایندهای بلادرنگ مناسب است. ترکیب بردار حالت (state-vector) و اندازه گیری (Measurement) دو روش داده براساس صافی کالمن است.



شکل ۴-۱) ترکیب بردار حالت



شکل ۴-۲- ترکیب مقادیر اندازه گیری

همانطور که در شکل های ۱-۴ و ۲-۴ آمده ، روش ترکیب بردار حالت از چندین فیلتر کالمن استفاده می کند. در این روش تخمین حالت را برای هر سنسور بصورت جداگانه بدست آورده و در نهایت عمل ترکیب انجام می - شود. ولی در روش ترکیب اندازه گیری مستقیماً مقادیر حسگرها ترکیب کرده و در نهایت از یک فیلتر کالمن عبور داده می شود. هر دو روش محاسن و معایبی دارند. ترکیب بردار حالت ، دارای هزینه کمتری و تلورانس خطای بهتری را دارا می باشد. روش اندازه گیری در بعضی از موارد نظیر ابعاد متفاوت در ماتریس های اندازه گیری غیرقابل اجراست.

۴-۳) روش ترکیب اطلاعات با استفاده از کواریانس

در این روش با استفاده از ترکیب ردیابی ، ردیابی محلی با استفاده از اطلاعات بدست آمده از سنسورها تخمین حالت از رابطه زیر بدست می آید. [32]

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \sum_{i=1}^N x^i(k+1|k+1) \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه $\hat{X}(k+1|k+1)$ تخمین حالت ترکیب شده می باشد که وزن سنسور i با i به صورت زیر بدست می آید

$$\mu_i = \frac{\sum_{l=1}^N P_R^l(k+1/k+1) - P_R^i(k+1/k+1)}{(N-1) \times \sum_{l=1}^N P_R^l(k+1/k+1)} \quad (2-4)$$

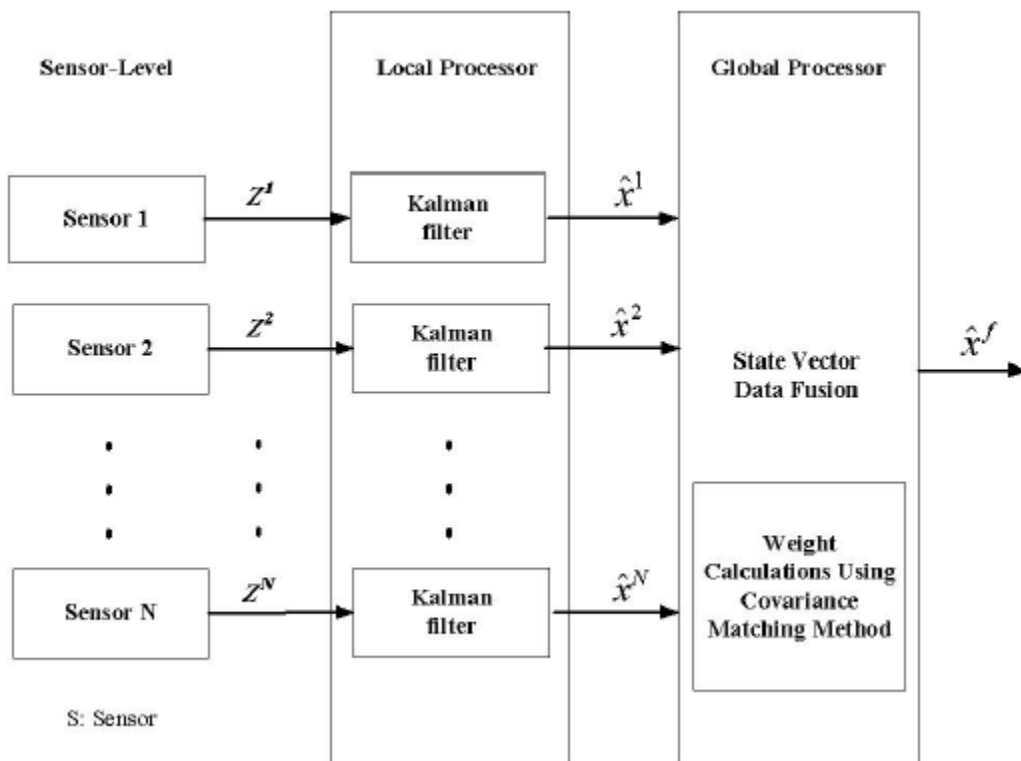
در این رابطه $P_r^i(k+1|k+1)$ ماتریس کواریانس حسگر i ام می باشد

۴-۴) ترکیب اطلاعات با ۴ حسگر

برای شبیه سازی هدف با ۴ حسگر به وسیله صافی کالمن ۲ حالت را در نظر می گیریم

۴-۴-۱) روش اول: ترکیب حالت

در این روش چهار سنسور به صورت جداگانه، اطلاعات را به چهار فیلتر کالمن می دهند سپس با استفاده از روش ترکیب کواریانس ضرایب i هر حسگر را با استفاده از رابطه (۲-۴) بدست می آوریم و تخمین حالت نهایی با استفاده از رابطه (۱-۴) بدست خواهد آمد.



شکل ۳-۴ ترکیب اطلاعات با صافی کالمن

در این روش کواریانس نویز حسگرها به دلیل وجود نویز با همدیگر تفاوت دارند که این مسئله به ساختار هر حسگر مربوط می‌شود و ما در عمل نمی‌توانیم حسگرهایی با مشخصات کاملاً یکسان داشته باشیم

۴-۴-۲) روش دوم: ترکیب حالت – اندازه گیری

در این روش پیشنهادی ترکیب دو حسگر را با هم در نظر گرفته والگوریتم را به این صورت ارائه می‌کنیم حسگر ۱ و ۲ دارای ترکیب اندازه‌گیری y_{12} و حسگر ۱ و ۳ دارای ترکیب اندازه‌گیری y_{13} می‌باشد و به همین صورت دیگر حسگرها را در نظر می‌گیریم و در نهایت اندازه‌گیری‌های ما به صورت $(y_{12} \ y_{13} \ y_{14} \ y_{23} \ y_{24})$ خواهد بود. در اینجا هر کدام از این بردارها به یک صافی کالمن وارد می‌شود و با استفاده از روش

ترکیب بردار حالت قسمت قبل به هرکدام از جفت حسگر ضربی می دهیم و با رابطه ۱ ترکیب حالت کلی را بدست می آوریم.

یکی از مشکلات عمده در زیر دریایی بحث موج دار بودن آب و ثابت نبودن حسگرها می باشد برای حل این مشکل از الگوریتم پیشنهادی ترکیب اطلاعات حسگرها می توان استفاده کرد. به دلیل اینکه نویز حسگرها متفاوت می باشد با ترکیب اطلاعات هر جفت حسگر می توان خطای اندازه گیری حالت قبل را کمتر کرد. که این موضوع باعث می شود تخمین بهتری داشته باشیم.

۴-۵) در نظر گرفتن نویز در حسگرها

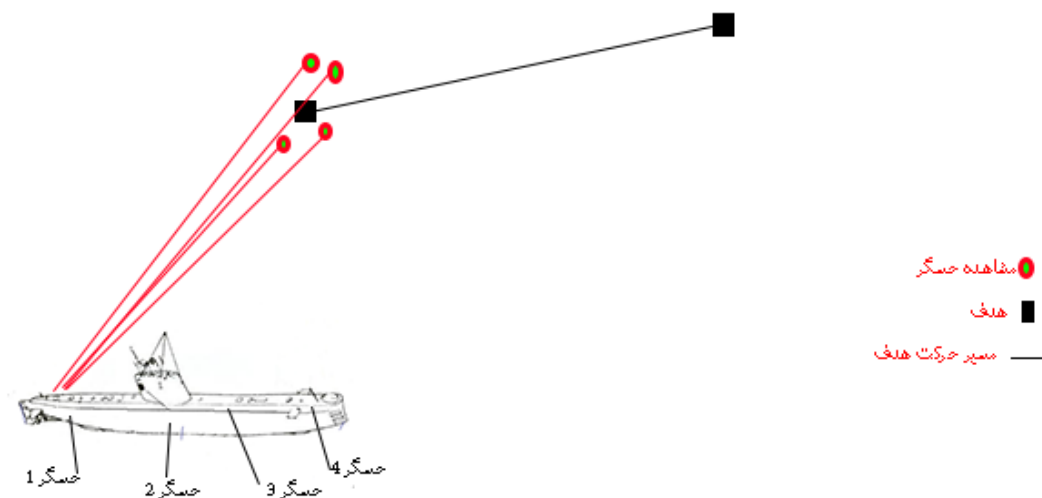
ماهیت هر مدل توسط معادلات حالت و مشاهدات بیان می شود. مدل سیستم و همچنین معادله اندازه گیری را بصورت زیر در نظر می گیریم.

$$X(K)=F X(k-1) + W(k) \quad (۳-۴)$$

$$Z(k)= \text{Arctan}\left(\frac{x_1(k)}{x_2(k)}\right) + V(k) \quad (۴-۴)$$

که $V(k)$ و $W(k)$ فرآیندهای تصادفی دارای توزیع مستقل یکسان گوسی با میانگین صفر که به ترتیب با ماتریس کواریانس $Q(k)$ و $R(k)$ بوده و نویز فرآیند و نویز اندازه گیری را مدل می کنند.

در اینجا ما چهار حسگر داریم که هر کدام از این حسگرها دارای اندازه گیری متفاوتی می باشد (با توجه به فاصله حسگرها از هم زوایای بدست آمده تغییر می کند) نحوه اندازه گیری برای یک حسگر را شرح می دهیم که این قضیه برای حسگرهای دیگر هم صدق می کند برای بدست آوردن شرایط اولیه تخمین مناسب، ابتدا حسگر شماره یک، ده اندازه گیری انجام می دهد. در شکل زیر می بینید این مقدار دارای خطا می باشد.



شکل ۴-۴ ردیابی هدف با زیردریایی به وسیله چهار حسگر

برای پیدا کردن تخمین اولیه ما ابتدا ده مشاهده از حسگر را ثبت می کنیم و با گرفتن میانگین آن مقدار اولیه نزدیک هدف مشخص می شود. حسگر دارای نویز اندازه گیری می باشد و در هر اندازه گیری دارای خطایی در مقدار زاویه دریافتی می شود.

$$Z_0(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i(k) \quad N=10 \quad (5-4)$$

اندازه گیری اولیه برای هر حسگر انجام می شود و زاویه اولیه تخمین هر کدام از حسگرها بدست می آید سپس با استفاده از این زاویه مقدار اولیه تخمین بدست می آید. مقدار نویز اندازه گیری برای هر کدام از حسگرها جداگانه به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

و ماتریس R که توسط آن بردار نویز اندازگیری ایجاد می‌شود به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

در نهایت هر کدام از حسگرها با ده اندازه‌گیری و گرفتن میانگین اندازه‌گیری‌ها مقدار اولیه تخمین را تعیین می‌کنند و در ادامه هر حسگر مشاهدات خود را به یک صافی کالمن بی رد خواهد داد و با استفاده از تبدیل بی-رد نقاط سیگما ساخته می‌شوند و با استفاده از ساختار صافی کالمن بی رد تخمین موقعیت هدف برای هر حسگر بدست می‌آید و با استفاده از روشی که در قسمت قبل شرح داده شد، اطلاعات چهار حسگر با هم ترکیب می‌شوند و تخمین مکان نهایی هدف بدست می‌آید.

۴-۶) جایابی حسگرها

زمانی که به ردیابی یک هدف با استفاده از چند حسگر با اندازه‌گیری‌های آغشته به نویز می‌پردازیم، جایابی حسگرها می‌تواند تاثیر زیادی در دقت تخمین ما داشته باشد.

در اینجا جایابی سنسورها بر اساس ماتریس اطلاعات فیشر خواهد بود. که شرایط لازم و کافی برای جایابی بهینه حسگرها پیشنهاد خواهد شد. تئوری ارائه شده براساس نظریه فریم می‌باشد.[34]

در اینجا ما با یک هدف و چند حسگر زاویه کار خواهیم کرد، که محدوده اندازه گیری حسگر محدود می‌باشد. حسگرها یکسان ولی دارای نویز اندازه‌گیری متفاوت می‌باشند. موقعیت هدف را P و موقعیت حسگر را S_i در نظر می‌گیریم. هدف اصلی در اینجا بدست آوردن مکان حسگرها برای کمینه کردن مقدار عدم قطعیت ردیابی هدف می‌باشد.

۴-۷) مدل اندازه‌گیری فقط زاویه

مدل اندازه‌گیری فقط زاویه برای i حسگر با نویز را به صورت زیر در نظر بگیرید

$$\hat{m}_i(s_i, P) = m_i(s_i, P) + w_i \quad (۷-۴)$$

S_i مکان حسگر i ام، P مکان هدف و w_i نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

$$m_i(s_i, P) = \frac{s_i - P}{\|s_i - p\|} \quad (۸-۴)$$

خطای اندازه‌گیری w_i با توزیع گوسی میانگین صفر در نظر گرفته می‌شود

۴-۸) ماتریس اطلاعات فیشر

ماتریس اطلاعات فیشر، مشخصات موقعیت هدف برا اساس اندازه گیری را می تواند توصیف کند. با فرض اینکه نویز حسگرها ناهمبسته باشد FIM^{28} را به صورت زیر تعریف می کنیم. [36]

$$F = \sum_{i=1}^N (\nabla_p m_i)^T \Sigma_i^{-1} \nabla_p m_i \quad (9-4)$$

$\nabla_p m_i$ مقدار جاکوبین $m_i(s_i, P)$ می باشد که مقدار آن به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\nabla_p m_i = -\frac{1}{\|r_i\|} (I - m_i m_i^T) \quad (10-4)$$

در رابطه (8) $r_i = s_i - P$ می باشد که می توان FIM را به صورت زیر نوشت

$$F = \sum_{i=1}^N c_i^2 (I - m_i m_i^T) \quad (11-4)$$

$$c_i^2 = \frac{1}{\sigma_i \|r_i\|} > 0 \quad (12-4)$$

²⁸ Fisher Information Matrix

برای کمینه کردن خطای تخمین ردیابی ، یک سنجش بهینه گسترده بیشینه کردن دترمینان F یا همان کمینه کردن باند پایین کرامر- رائو می باشد. برای این منظور مقدار ویژه ماتریس F را $\{\lambda_j\}_{j=1}^d$ در نظر می گیریم از آنجایی که $\{c_i\}_{i=1}^N$ ثابت است

$$\det F = \prod_{j=1}^d \lambda_j \leq \bar{\lambda}^d \quad (۱۳-۴)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d \lambda_j \quad (۱۴-۴)$$

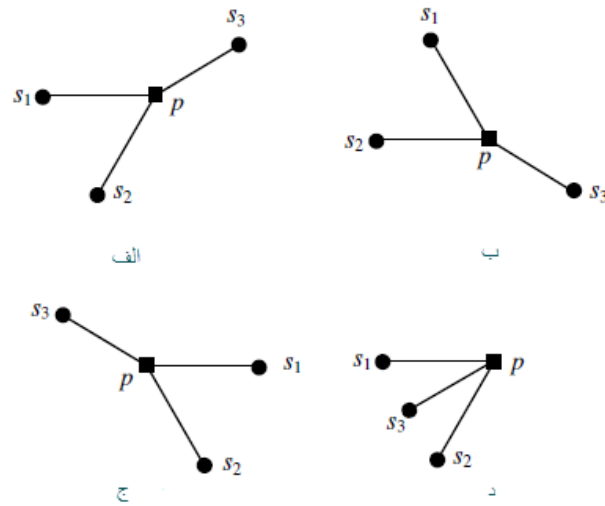
که $\det F$ زمانی بیشینه می شود که $\lambda_j = \bar{\lambda}$ باشد

در نهایت جایابی بهینه به صورت زیر بدست خواهد آمد

$$\{m_i^*\}_{i=1}^N = \arg \min \|F - \bar{\lambda}\|^2 \quad (۱۵-۴)$$

ماتریس F زمانی تکین می شود که تمامی حسگرها و همچنین هدف در یک خط راست قرار بگیرند که در این صورت عدم قطعیت بینهایت می شود. این مدل بدترین جایابی می باشد.

چرخش هر کدام از حسگرها حول هدف باعث تغییر ماتریس F نخواهد شد که در این صورت می توان شکل های زیر را هم ارز یکدیگر گرفت. [37]

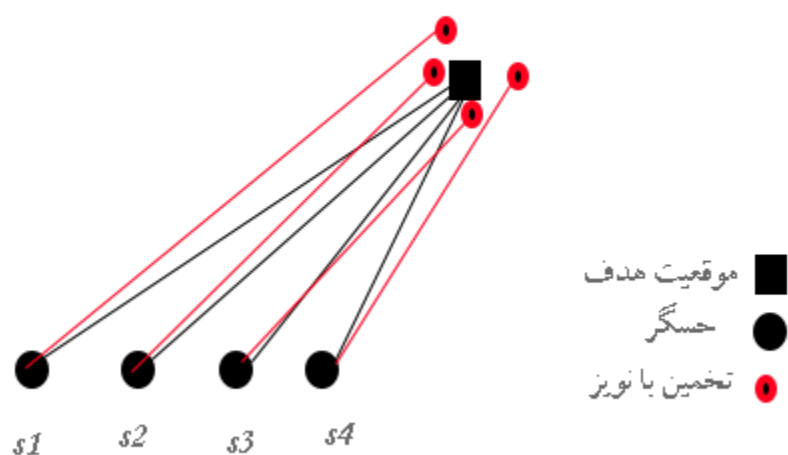


شکل ۴-۵ مثالی از هم ارزی جایابی الف) جایابی اصلی ب) چرخش کل حسگرها به اندازه ۶۰ درجه حول هدف در جهت عقربه های ساعت ج) منعکس کردن کل حسگرها حول محور عمودی د) چرخش حسگر S3 حول هدف

در ادامه توپولوژی‌های مختلف با استفاده از چهار سنسور را مقایسه می کنیم

۴-۹) توپولوژی خطی حسگرها

در این توپولوژی تمامی حسگرها در یک خط راست می‌باشند. در شکل زیر موقعیت حسگرها را می‌بینید.



شکل ۴-۶ جایابی خطی حسگرها

برای بررسی این توپولوژی با توجه به قسمت ترکیب اطلاعات از سه مدل ترکیب استفاده خواهیم کرد و مقایسه می‌کنیم.

حالت اول

در این روش چهار سنسور به صورت جداگانه، اطلاعات را به چهار فیلتر کالمن می دهند سپس با استفاده از روش ترکیب کواریانس ضرایب i هر حسگر را با استفاده از رابطه (۴-۲) بدست می آوریم و تخمین حالت نهایی با استفاده از رابطه (۴-۱) بدست خواهد آمد.

حالت دوم

با توجه به توضیحاتی که در بخش ۴-۴-۲ دادیم در این روش هر جفت حسگر با هم گرفته می شود. و از ترکیب جفت ها با هم ترکیب نهایی بدست می آید.

حالت سوم

در این روش هر سه حسگر را با هم در نظر می گیریم و دارای اندازه گیری های $(y_{123} \ y_{124} \ y_{234})$ می - باشیم. ترکیب اطلاعات سه حسگر را با استفاده از روش ترکیب اطلاعات کواریانس بدست آورده و در مرحله بعد یک بار دیگر اندازه گیری های بدست آمده را با هم ترکیب می کنیم این روش دارای پیچیدگی محاسباتی می باشد و زمان اجرای آن از دو حالت قبل بیشتر است چون تخمین هدف باید از دو صافی کالمن بگذرد.

۴-۱۰) شبیه سازی جایابی خطی

در این حالت مکان حسگرها را به صورت زیر در نظر می گیریم

$$\begin{aligned} S1 &= [-500; -160]; \\ S2 &= [-550; -160]; \\ S3 &= [-600; -160]; \\ S4 &= [-650; -160]; \end{aligned}$$

به منظور شبیه سازی مسیر حرکت هدف ابتدا باید مسیری دلخواه برای حرکت هدف مشخص شود که در اینجا هدف از مختصات $[80, -90]$ با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در راستای محور X و ۰,۵ متر بر ثانیه در راستای محور Y حرکت می کند.

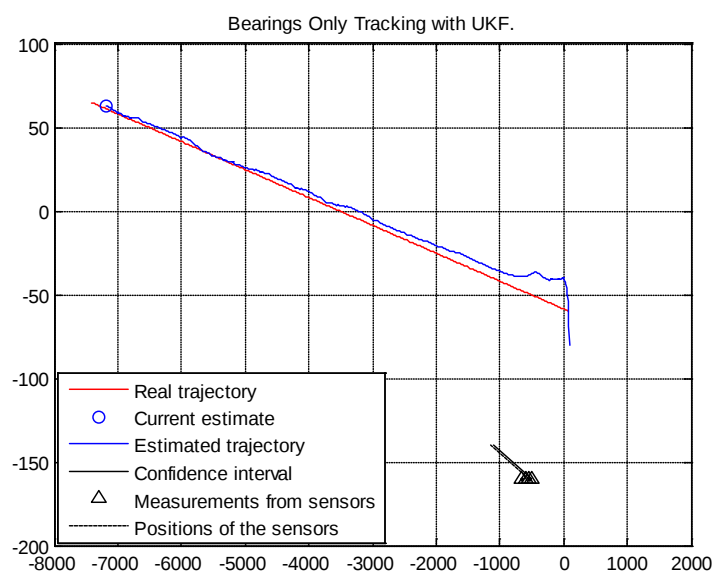
در معادله مشاهدات، نویز مربوط به زاویه های دریافتی توسط حسگرها با توجه به شدت سیگنال به نویز انتخاب می شود که با وجود توان سیگنال مشاهدات بدون نویزی و نویز اضافه شده بر حسب دسی بل بیان می شود.

$$(db)L_{db} = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (۴-۱۶)$$

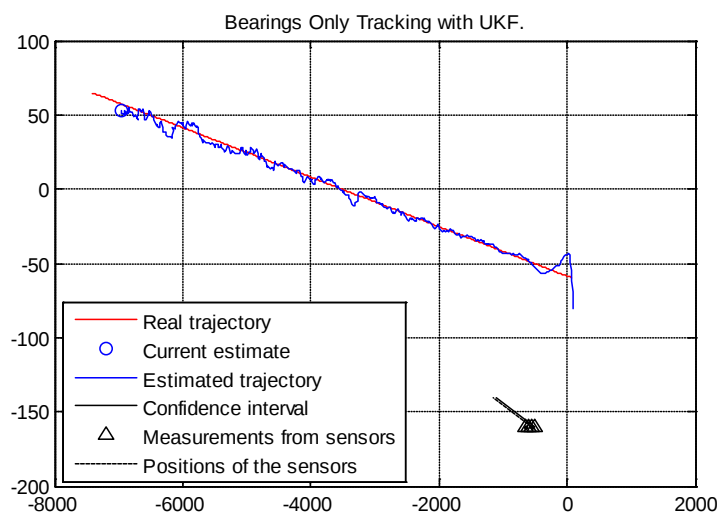
شدت سیگنال به نویز در نظر گرفته شده برای بردار مشاهدات ۳۶ دسی بل می باشد.

به منظور ارزیابی عملکرد صافی در فرایند تخمین، از معیار میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده می کنیم که می تواند برای ارزیابی دقت تخمین در هر دو محور مختصات به کار گرفته شود. رابطه معیار مجذور میانگین مربعات خطا را برای برد تخمینی در فاصله زمانی T نشان می دهد.

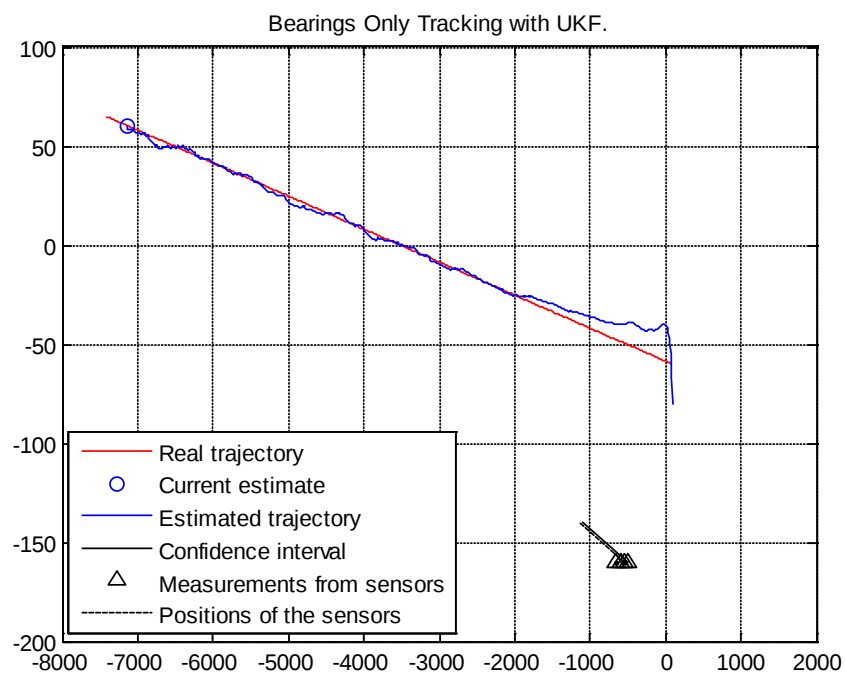
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T ((\hat{x}_t - x_t)^2 + (\hat{y}_t - y_t)^2)} \quad (۴-۱۷)$$



شکل ۴-۷ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت اول



شکل ۴-۸ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت دوم



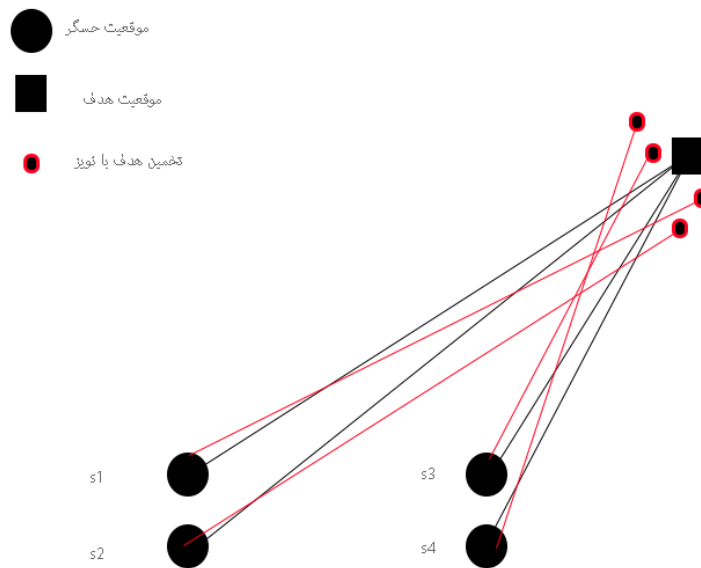
شکل ۴-۹ ردیابی هدف با چهار حسگر خطی - حالت سوم

Method	RMSE – x1		RMSE – x3	RMSE – x4
حالت اول	7.31	1.87	1.12	1.65
حالت دوم	6.97	1.74	1.08	1.54
حالت سوم	6.86	1.65	1.09	1.41

جدول ۴-۱ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جایابی خطی

۴-۱۱ توپولوژی جایابی مربعی

موقعیت حسگرها به صورت زیر می باشد



شکل ۴-۱۰ جایابی مربعی با چهار حسگر

در این توپولوژی حسگرها به صورت مربعی در نظر گرفته شده اند. تفاوت این جایابی با توپولوژی خطی، در مشاهده پذیری بهتر نسبت به هدف می باشد

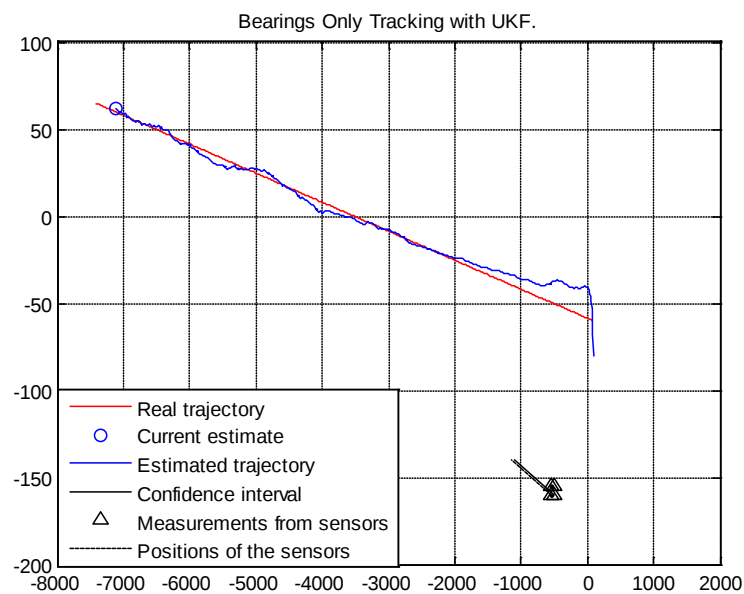
در این حالت مکان حسگرها را به صورت زیر در نظر میگیریم

$$S1 = [-500; -160]$$

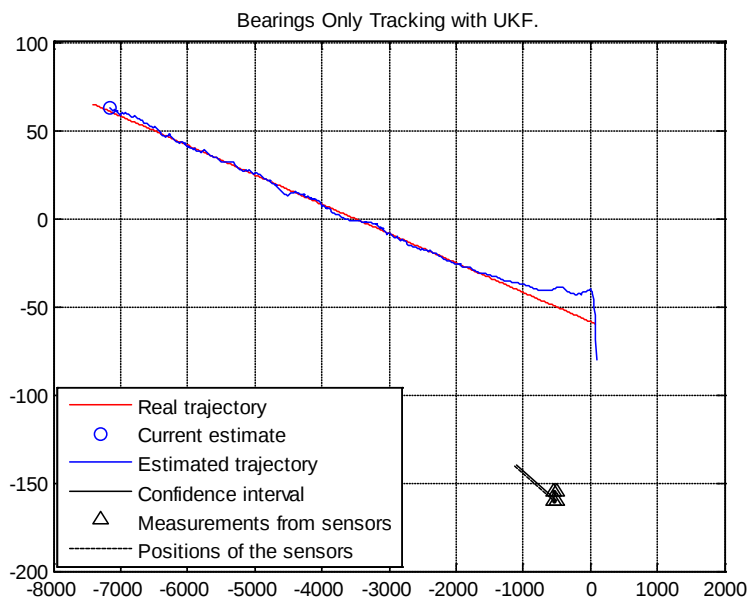
$$S2 = [-550; -160]$$

$$S3 = [-500; -155]$$

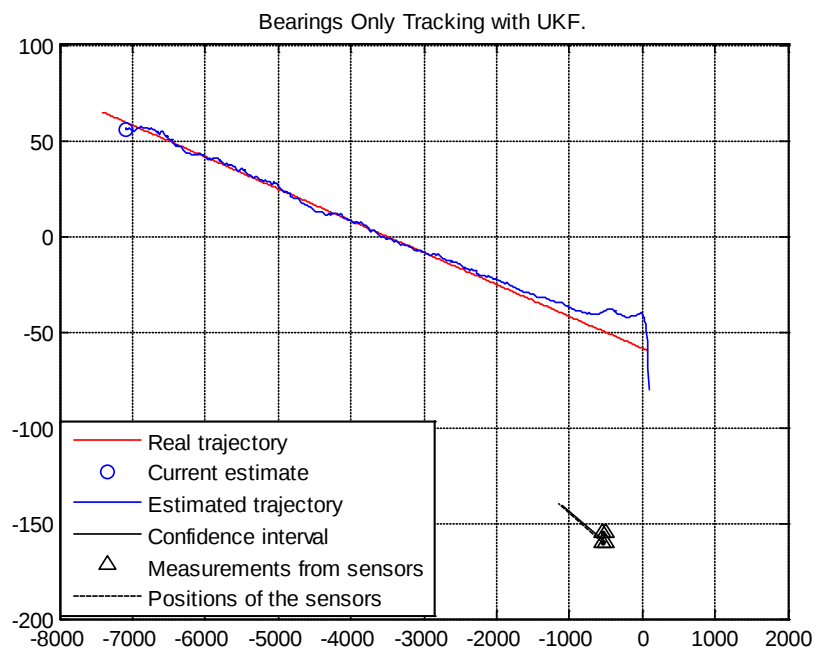
$$S4 = [-550; -155]$$



شکل ۴-۱۱ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت اول



شکل ۴-۱۲ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت دوم



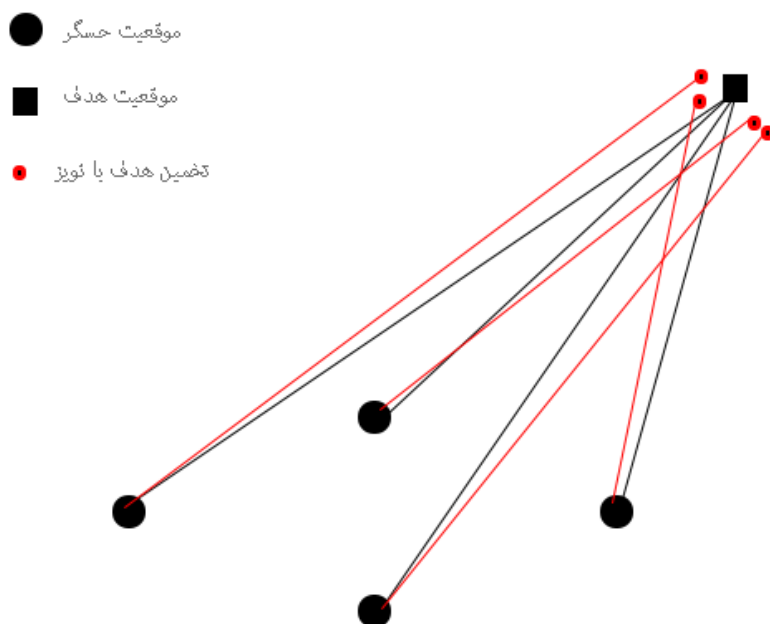
شکل ۴-۱۳ ردیابی هدف با چهار حسگر مربعی - حالت سوم

Method	RMSE – x1		RMSE – x3	RMSE – x4
حالت اول	7.14	1.35	0.98	1.14
حالت دوم	6.14	1.09	0.75	1.21
حالت سوم	6.08	1.01	0.69	1.17

جدول ۴-۲ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جاییابی مربعی

۴-۱۲) توپولوژی جایابی بیضی

موقعیت حسگرها به صورت زیر می باشد

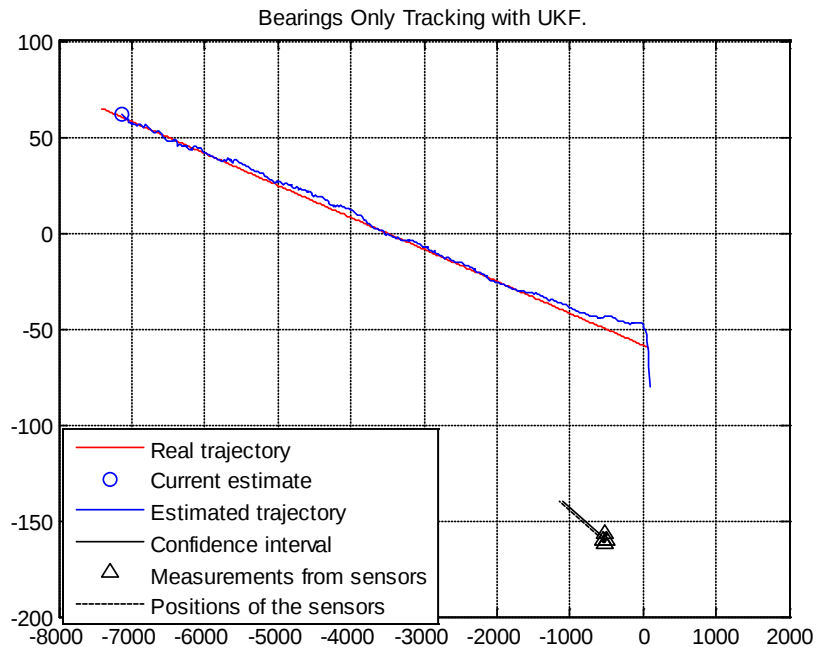


شکل ۴-۱۴ ردیابی بیضوی با چهار حسگر

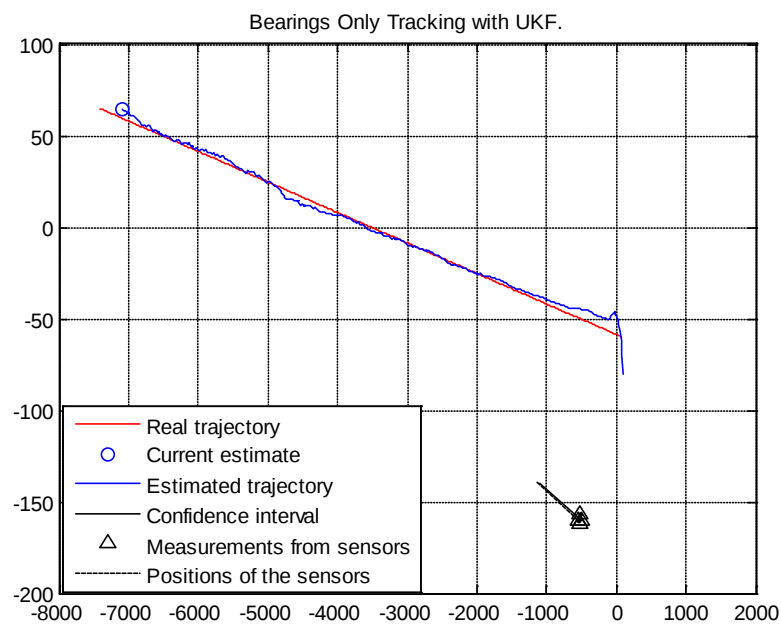
در این توپولوژی حسگرها به صورت متقارن بر روی یک بیضی قرار می گیرند در اینجا ما از چهار حسگر استفاده کرده ایم که این چهار حسگر به صورت بالا قرار می گیرند. این توپولوژی یک توپولوژی مناسب برای سیستم های زیرآبی می باشد.

در این حالت مکان حسگرها را به صورت زیر در نظر می گیریم

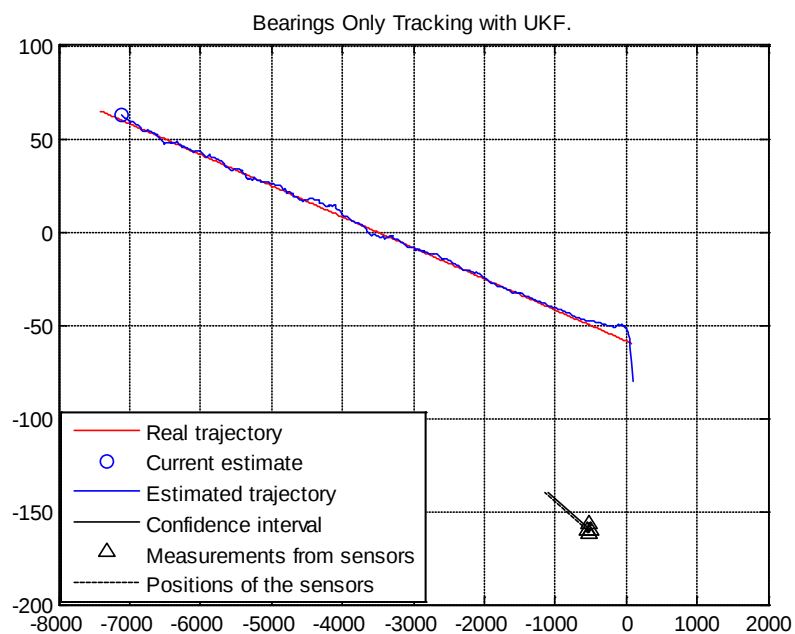
$$\begin{aligned} S1 &= [-500; -160] \\ S2 &= [-550; -160] \\ S3 &= [-500; -155] \\ S4 &= [-550; -155] \end{aligned}$$



شکل ۴-۱۵ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جایابی بیضی - حالت اول



۴-۱۶ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جایابی بیضی - حالت دوم



۴-۱۷ ردیابی هدف با چهار حسگر توسط توپولوژی جایابی بیضی - حالت سوم

Method	RMSE – x1		RMSE – x3	RMSE – x4
حالت اول	6.67	0.98	0.75	1.38
حالت دوم	5.76	0.85	0.63	1.12
حالت سوم	5.64	0.79	0.57	0.97

جدول ۴-۳ مقایسه RMSE متغیرهای حالت در جایابی بیضی

با توجه به توپولوژی های پیشنهاد شده و مقایسه آن ها توپولوژی بیضوی مناسب تر از دیگر توپولوژی ها می باشد. از رابطه (۴-۱۵) می توان نتیجه گرفت هرچقدر فاصله حسگرها زیادتیر باشد پوشش بهتری برای ردیابی داریم در توپولوژی خطی احتمال این است که هدف در راستای خط حسگرها قرار گیرد که در این صورت بدترین حالت ردیابی چهار حسگر خواهد بود اما در دو توپولوژی دیگر این نقص برطرف شده و توپولوژی بیضوی با توجه به پوشش کافی و فاصله مناسب حسگرها از یکدیگر الگوریتمی بهینه می باشد. البته این موضوع را باید در نظر گرفت چون فضای حسگرها در کار ما محدود می باشد و زیردریایی دارای ابعادی مشخص است ، نمی توان از حسگرها در اطراف هدف استفاده کرد. با مقایسه روش های ترکیب حالت پیشنهادی به این نتیجه می رسیم ترکیب حالت سوم با آن که خطای تخمین را کاهش می دهد اما با در نظر گرفتن زمان تخمین ترکیب حالت دوم مناسب تر می باشد.

۴-۱۳) شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با چهار حسگر:

در این قسمت به شبیه سازی ردیابی غیر فعال هدف می پردازیم. از سه نوع صافی کالمن جهت برآورد موقعیت و سرعت هدف در مختصات دکارتی استفاده شده است.

سرعت حسگرها برابر صفر در نظر گرفته شده است که این به معنای ثابت بودن حسگرها می باشد. موقعیت اولیه ای که هدف شروع به حرکت می کند به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$X_0 = [0, -5, -98, -4, 0.3, 0.1] \quad (۱۸-۴)$$

$$\hat{X}_0 = [5, 0, -90, -5, 0.4, 0.2] \quad (۱۹-۴)$$

$$P_0 = \text{diag} [50, 15, 15, 5, 0.4, 0.4] \quad ; \quad Q_0 = 0.0002 I_6 \quad (۲۰-۴)$$

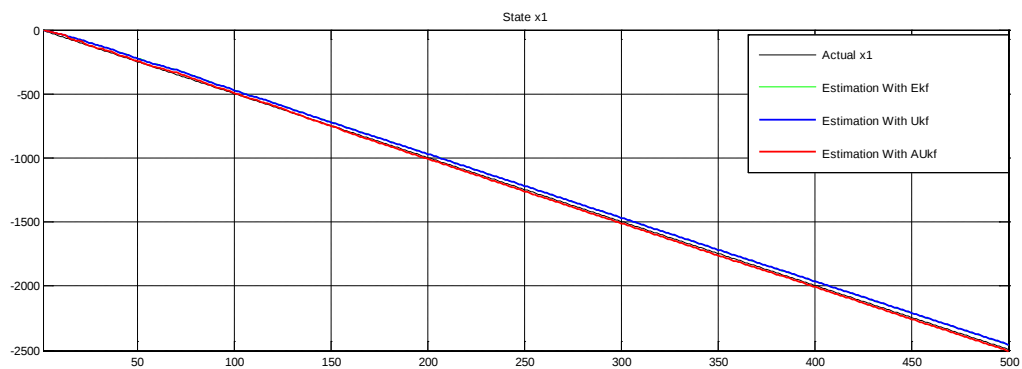
$$R_0 = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (۲۱-۴)$$

به عبارتی هدف متحرک ساطع کننده سیگنال های آکوستیکی از موقعیت $x=0$ ، $y=-5$ و $z=-98$ با سرعتی ثابت شروع به حرکت کرده و دارای سرعتی معادل با 4 km/s در راستای محور x ها، سرعتی معادل با 3 km/s در راستای محور y ها و سرعتی معادل با 1 km/s در راستای محور z ها در حال حرکت می باشد.

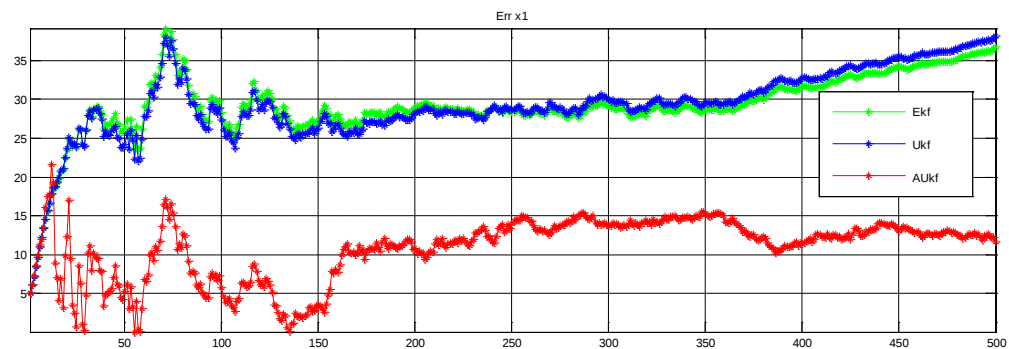
و مقدار ماتریس Q که توسط آن بردار نویز فرآیند ایجاد می شود را ثابت و برابر $Q = Q_0 = 0.0001 I_6$ در نظر می گیریم و ماتریس R که توسط آن بردار نویز اندازه گیری ایجاد می شود به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix} \quad (22-4)$$

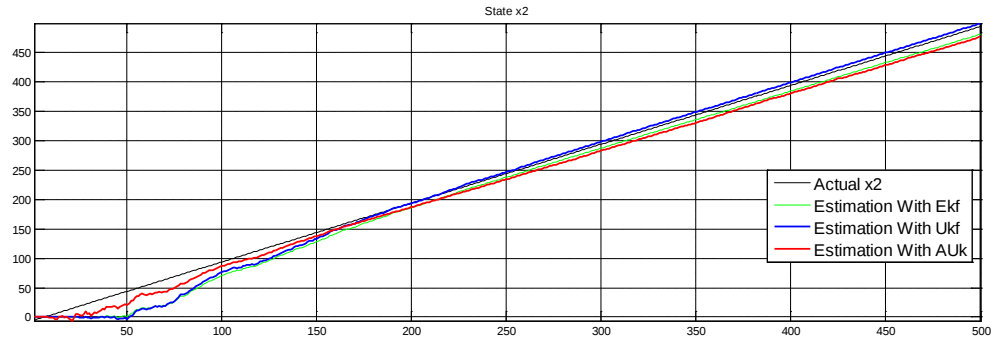
تخمین حالت و مقدار جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) حالات تخمین زده شده توسط صافی EKF, Ukf و Aukf را در شکل‌های زیر مشاهده می‌کنید.



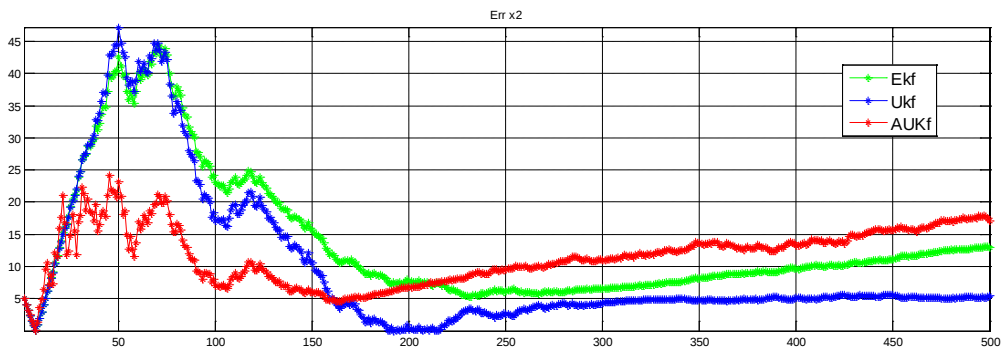
شکل ۴-۱۸ مقدار تخمین X_1



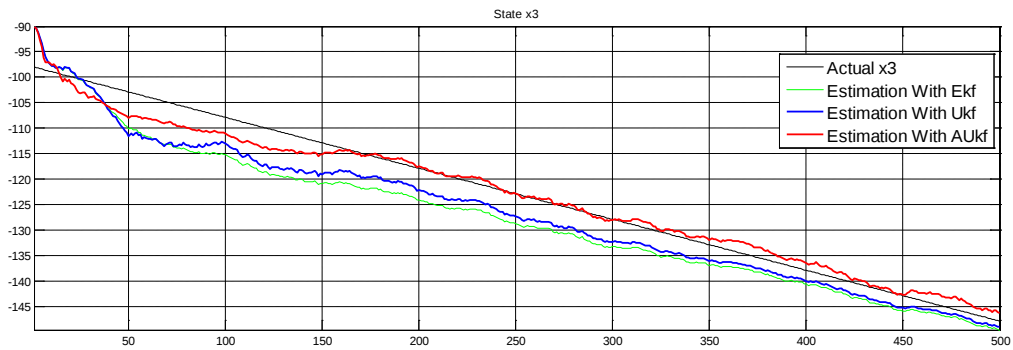
شکل ۴-۱۹ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_1



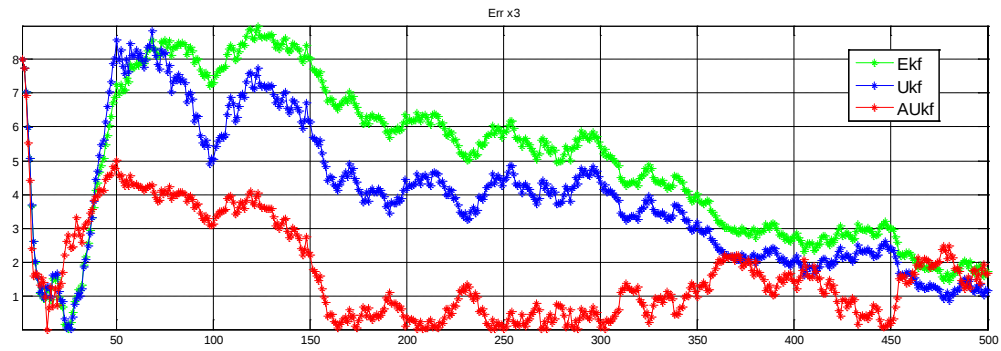
شکل ۲۰-۴ مقدار تخمین X_2



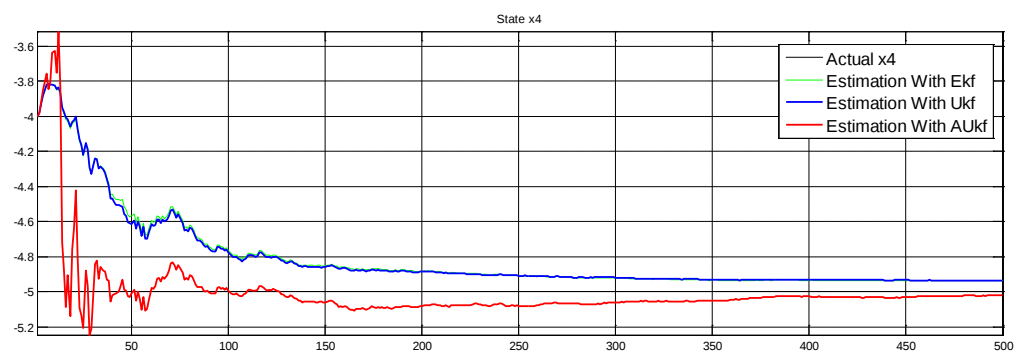
شکل ۲۱-۴ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_2



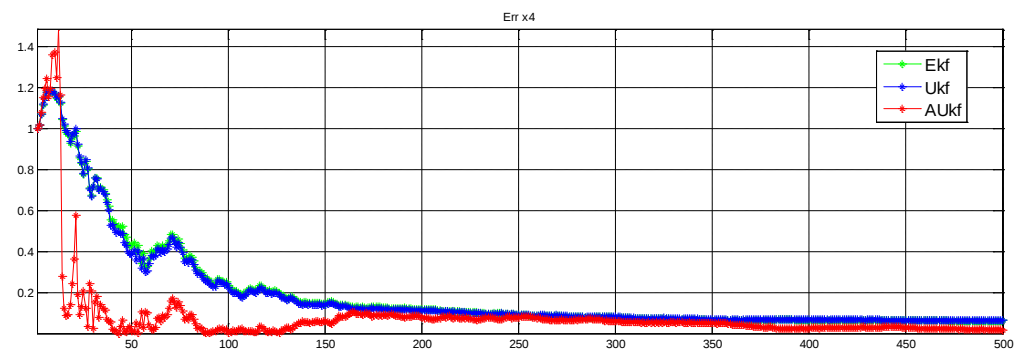
شکل ۲۲-۴ مقدار تخمین X_3



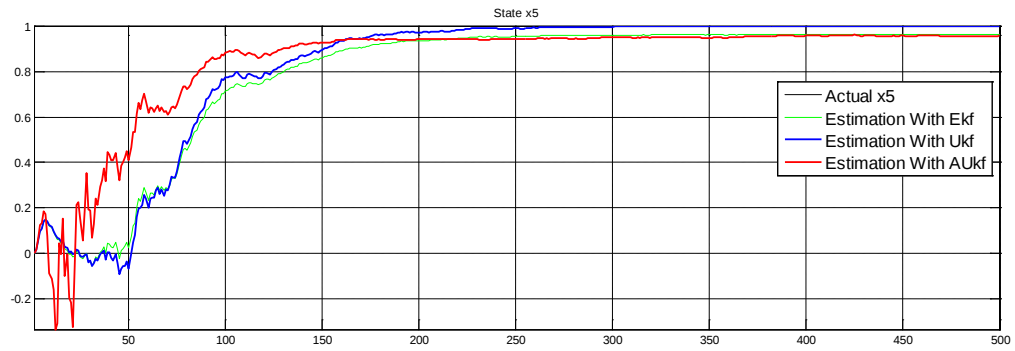
شکل ۴-۲۳ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_3



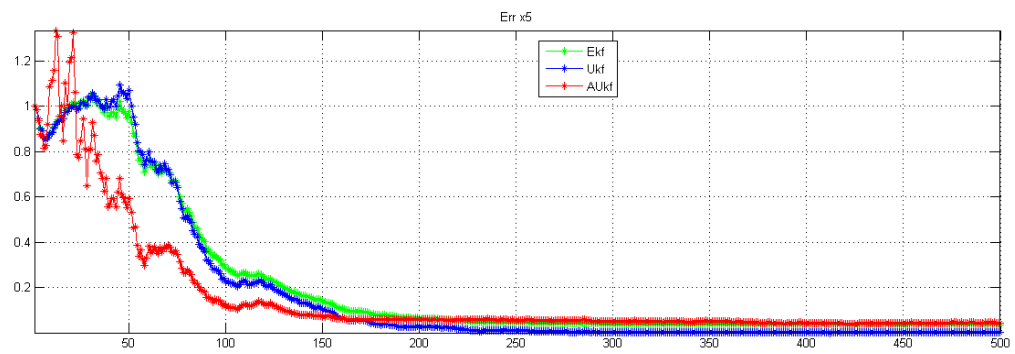
شکل ۴-۲۴ مقدار تخمین X_4



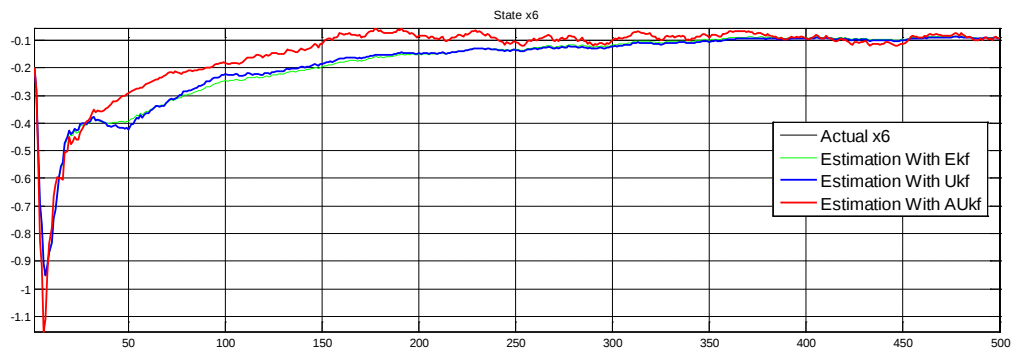
شکل ۴-۲۵ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_4



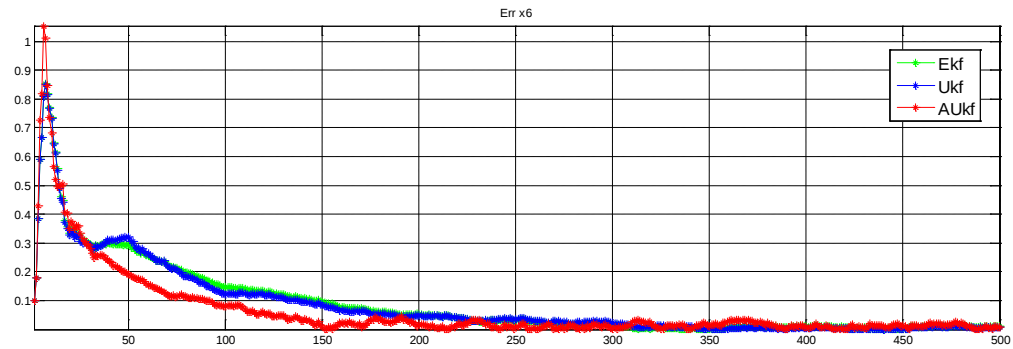
شکل ۴-۲۶ مقدار تخمین X_5



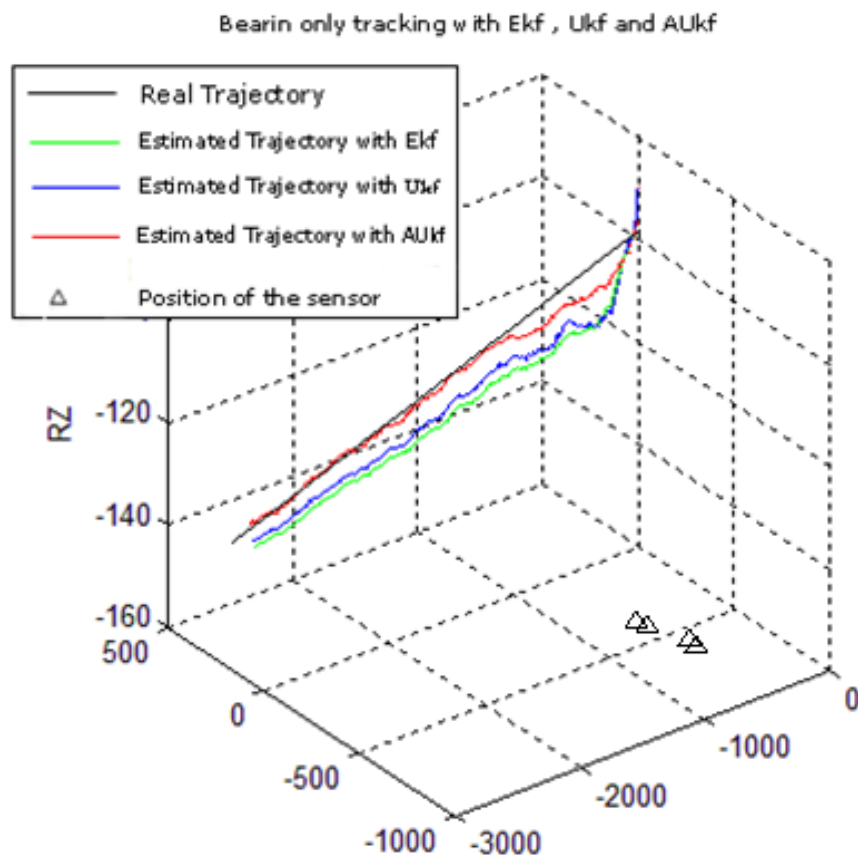
شکل ۴-۲۷ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_5



شکل ۴-۲۸ مقدار تخمین X_6



شکل ۴-۲۹ جذر میانگین مربعات خطای حالت X_6



شکل ۴-۳۰ مقایسه ردیابی یک هدف با دو حسگر با استفاده از صافی EKF و UKF و AUKF

معیار مقایسه	EKF	UKF	AUKF
RMSE- X^1	34.4465	31.7247	14.3508
RMSE- X^2	7.8581	7.3351	6.4740
RMSE- X^3	2.9468	2.1657	1.3216
RMSE- X^4	0.2325	0.2172	0.1246
RMSE- X^5	0.1908	0.1893	0.1618
RMSE- X^6	0.1507	0.1413	0.1063

جدول ۴-۴ مقایسه خطای میانگین مربعات سه صافی EKF, UKF, AUKF در ردیابی هدف

مقایسه نحوه ردیابی هدف زیر آب در فضای سه بعدی، توسط سه صافی بیان شده در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴-۳۰ می‌بینید صافی کالمن Aukf بهتر از EKF و Ukf توانسته هدف را ردیابی کند و خطای RMSE ردیابی برای حالت‌ها را در جدول ۴-۴ مشاهده می‌کنید کمترین میزان خطا مربوط به صافی کالمن AUKF می‌باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادهات

۵-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه، ردیابی غیر فعال اهداف زیر آب بررسی شد. ساختار در نظر گرفته شده برای روابط هندسی هدف و حسگرها بدین صورت است که سیگنال انعکاس شده از هدف با زوایای مختلف توسط حسگرها دریافت می شود. این مشاهدات دریافتی توسط یک رابطه غیرخطی با بردار حالت سیستم دارد. در سیستم پیاده سازی شده عملی، داده های

- در این پایان‌نامه از چهار حسگر ثابت استفاده شده است و با توجه به ثابت بودن حسگرها بحث فقر زاویه پیش خواهد آمد که برای رفع این مشکل می‌توان حسگرها را متحرک و دارای مانور کرد. که در این حالت با حرکت حسگر مشاهده‌پذیری بهتری از موقعیت هدف بدست خواهد آمد.
- به منظور بهبود تخمین می‌توان تعداد حسگرها را افزایش داد. استفاده از آرایه حسگری یکی از موضوعاتی است که در بهبود تخمین موقعیت هدف تاثیر بسزایی دارد.
- در این پایان‌نامه فرض کردیم نویز اندازه‌گیری و مشاهده نوسز سفید گوسی می‌باشد. می‌توان نویز رنگی به جای نویز سفید در نظر گرفت که در این صورت باید از روش‌های دیگری برای تخمین موقعیت هدف استفاده کرد.
- برای بهینه کردن ماتریس نویز اندازه‌گیری می‌توان از روش‌های فازی یا عصبی بهره برد.
- همچنین یکی از پیشنهادات مهم می‌تواند تعمیم سیستم ردیاب غیر فعال تک هدف، به چند هدف باشد.
- حرکت هدف در این پایان‌نامه با سرعت ثابت در نظر گرفته شده است که می‌توان به بررسی هدف با سرعت متحرک (شتاب دار) و مانوردار پرداخت.

منابع

[1] A. D. Waite(2002), “Sonar for Practising engineers” Published by John Wiley & Sons Ltd,2002

- [2] Hodges, Richard P. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. John Wiley & Sons.
- [3] Lurton, Xavier. (2002). "An introduction to underwater acoustics: principles and applications". Springer.
- [4] Ainslie, Michael A. (2010), "Principles of sonar performance modelling". Springer.
- [5] Xu, Zhaopeng, (2011), and Shuping Han. "Research on the initial value of filtering for passive tracking of moving target based on two sonar sensors' bearing." In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on*, pp. 420-423. IEEE.
- [6] Yocom, Bryan A., Thomas W. Yudichak, and Brian R. La Cour. (2009). "Bayesian passive sonar tracking in the presence of known interferers." In *Information Fusion, 2009. FUSION'09. 12th International Conference on*, pp. 1821-1829. IEEE.
- [7] Han, Shuping, and Zhaopeng Xu. (2011). "Passive tracking of maneuvering target based on bearings-frequency of two sonar sensors." In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on*, pp. 2174-2177. IEEE.
- [8] Zhaopeng Xu and Shuping Han, (2011), "Application of UKF for passive tracking of maneuvering target based on bearings of two sonar sensors", *Image and Signal Processing (CISP), 2011 4th International Congress on (Volume:5)*, Shanghai.
- [9] Doğançay, Kutluyil. (2005). "Bearings-only target localization using total least squares." *Signal Processing* 85, no. 9: 1695-1710.
- [10] Fei, Zhang, Zhou Xing-peng, Chen Xiao-hui, and Liu Rui-lan. (2008). "Particle filter for underwater bearings-only passive target tracking." In *Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA'08. Pacific-Asia Workshop on*, vol. 2, pp. 847-851. IEEE.
- [11] El-Hawary, F., and Yuyang Jing. (1995). "Robust regression-based EKF for tracking underwater targets." *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 20, no. 1: 31-41.
- [12] El-Hawary, Ferial, and Yuyang Jing. (1993). "A robust pre-filtering approach to EKF underwater target tracking." In *OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*, pp. II-235. IEEE.
- [13] Yali, Wang. (2008) "Bearings-only Maneuvering Target Tracking based on STF and UKF." In *Advanced Computer Theory and Engineering, 2008. ICACTE'08. International Conference on*, pp. 295-299. IEEE.
- [14] Yali, Wang. (2008). "Bearings-only Maneuvering Target Tracking based on STF and UKF." In *Advanced Computer Theory and Engineering, 2008. ICACTE'08. International Conference on*, pp. 295-299. IEEE.
- [15] Grewal M.S and Andrews A.P , (2001), "Kalman Filtering : Theory and Practice using Matlab", vol.1, Second Edition, John Wiley & Sons, USA.
- [16] Kalman, Rudolph Emil. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems." *Journal of Fluids Engineering* 82, no. 1 :35-45.

- [17] S. Sathya and S. Mondal and M. Srinivasana, (2006), "Sigma point Kalman filter for bearing only tracking", *Signal Processing* Volume 86, Issue 12, Pages 3769–3777
- [18] Kalman, Rudolph E., and Richard S. Bucy. (1961). "New results in linear filtering and prediction theory." *Journal of Fluids Engineering* 83, no. 1 95-108.
- [19] Reif, Konrad, Stefan Günther, E. YAZ SR, and Rolf Unbehauen. (1999). "Stochastic stability of the discrete-time extended Kalman filter." *IEEE Transactions on Automatic Control* 44, no. 4 :714-728.
- [20] Julier, Simon J., and Jeffrey K. Uhlmann. (2002). "Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through nonlinear transformations." In *American Control Conference, proceedings of the 2002*, vol. 2, pp. 887-892. IEEE.
- [21] Lefebvre, Tine, Herman Bruyninckx, and Joris De Schuller. (2002). "A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators" *.Automatic Control, IEEE Transactions on* 47, no. 8 :1406-1409.
- [22] Julier, Simon J. (2002). "The scaled unscented transformation." In *American Control Conference, Proceedings of the 2002*, vol. 6, pp. 4555-4559. IEEE.
- [23] Lefebvre, T, Bruyninckx, H., and De Schutter, J. (2004). "Kalman Filters for Nonlinear Systems A Comparison of Performance." *Intl. Journal of Control*, Vol. 77, No. 7, pp. 639-653.
- [24] Wu, Yuanxin, Dewen Hu, Meiping Wu, and Xiaoping Hu. (2005) "Unscented Kalman filtering for additive noise case: augmented vs. non-augmented." In *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, pp. 4051-4055. IEEE.
- [25] Sun, Fuming, Guanglin Li, and Jingli Wang. (2009). "Unscented Kalman filter using augmented state in the presence of additive noise." In *Control, Automation and Systems Engineering, 2009. CASE 2009. IITA International Conference on*, pp. 379-382. IEEE.
- [26] Hewer, G. A., Martin, R. D., and Zeh, J. (1987). "Robust Processing for Kalman Filter of Glint Noise." *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23, No. 1, pp. 120-128.
- [27] Wu, W. R. (1993). "Target Tracking with Glint Noise." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 1, pp. 174-185.
- [28] Wu, W. R., and Kundu, A. (1989). "Kalman Filtering in Non-Gaussian Environment Using Efficient Score Function Approximation." In *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 413-416.
- [29] Hall, David L., and James Llinas. (1997). "An introduction to multisensor data fusion." *Proceedings of the IEEE* 85, no. 1 :6-23.
- [30] Hoseini, Sayed Amir, and Mohammad Reza Ashraf. (2013). "Computational Complexity Comparison Of Multi-Sensor Single Target Data Fusion Methods By Matlab." *arXiv preprint arXiv:1307.3005* (2013).

- [31] Gan, Qiang, and Chris J. Harris. (2001). "Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion." *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 37, no. 1 (2001): 273-279.
- [32] Fong, Li-Wei. 2006. "Multisensor data fusion with estimated weights." In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, vol. 1, pp. 22-26. IEEE.
- [33] Cheng, Wang, Wang Yingmin, Yao Yuan, and Tao Linwei. 2010. "Bistatic sonar data fusion based on extend kalman filter and its application." In *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, vol. 3.
- [34] Casazza, P. G. (1999). "The art of frame theory". *arXiv preprint math/9910168*.
- [35] Krause, A., Singh, A., & Guestrin, C. (2008). Near-optimal sensor placements in Gaussian processes: Theory, efficient algorithms and empirical studies. *The Journal of Machine Learning Research*, 9, 235-284.
- [36] Zhao, S., Chen, B. M., & Lee, T. H. (2012, June). Optimal placement of bearing-only sensors for target localization. In *American Control Conference (ACC), 2012* (pp. 5108-5113). IEEE.
- [37] Zhao, S., Chen, B. M., & Lee, T. H. (2013). Optimal sensor placement for target localisation and tracking in 2D and 3D. *International Journal of Control*, 86(10), 1687-1704.
- [38] Glotzbach, T., Moreno-Salinas, D., Pascoal, A., & Aranda, J. (2013, September). Optimal Sensor Placement for Acoustic Range-Based Underwater Robot Positioning. In *9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS)*.
- [39] A. N. Bishop, B. Fidan, B. D. Anderson, K. Doğançay, and P. N. Pathirana, "Optimality analysis of sensor-target localization geometries," *Automatica*, vol. 46, pp. 479–492, 2010.

Abstract

It is Importance of object detection and tracking under water in the commercial, leisure and defense field. The need to improve the accuracy, stability and risk avoidance, with the advent of new applications and the growing acceptance of undersea robots spreads in military and civilian spreads. One of the main factors in the operation of underwater operations, long-term ability to automatically and without supervision by a ship on the surface, which is the subject of research is necessary to highlight underwater navigation. In this thesis aims to signals emitted from different angles by several sensors are received. Vector measured by the sensors, including arrival angle between the horizontal axis is the acoustical signal that has a linear relationship with the state vector. Due to the nonlinearity of the model and the data noise, we use the Uncented Kalman filter. In this thesis used a type of Kalman filter called augmented uncenced Kalman filter and compared with the uncenced Kalman filter and extended Kalman filter. Due to the use of multiple sensors, the sensors need to combine data is essential. Covariance method used to combine data and compare our method with this method is that the efficiency of the proposed method is characterized in results. The proposed method combines data by combining both sensor, advantages over the conventional methods, which can be referred to a higher accuracy and reduce the tracking error. Finally, check the placement of sensors, three to four sensor placement suggested that the issue of Bayesian model with Visibility is better than the other models.

Keywords: sonar, Single Tracking , Kalman filter, Uncenced Kalman Filter , Underwater targets, Multie Sensor, Bearings only target



University Of Shahrood

Department of Electrical and Robotic Engineering

Bearing Only Underwater Tracking with Multisensor by Uncented Kalman Filter

Sadegh Heidari Farahany

Supervisor:

Dr. Heydar Tusian Shandiz

2015