Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

OFDM Radar for Detecting a Rayleigh Fluctuating Target in Gaussian Noise

Mahboobeh Eghtesad*

Department of Electrical Engineering, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
mah_ehgtesadi@yahoo.com

Abstract: we develop methods for detecting a target for continuous wave orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based radars. As a preliminary step we introduce the target and Gaussian noise models in discrete time form. Then resorting to match filter (MF) we derive a detector for two different scenarios (a non- fluctuating target and a Rayleigh fluctuating target). It will be shown that a MF is not suitable for Rayleigh fluctuating targets. In this paper we propose a reduced complexity method based on fast Fourier transform (FFT) for such a situation. The proposed method has better detection performance. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated both by providing theoretical performance prediction expressions and by using simulated analyses.

Keywords: Constant false alarm rate (CFAR), match filter (MF), fast Fourier transform (FFT), OFDM radars, Rayleigh fluctuating target.

JCDSA, Vol. 2, No. 3, Autumn 2024	Online ISSN: 2981-1295	Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa
Received: 2024-08-06	Accepted: 2024-11-26	Published: 2024-12-20

CITATION

Eghtesad, M., "*OFDM Radar for Detecting a Rayleigh Fluctuating Target in Gaussian Noise*", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 3, pp. 63-71, 2024.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

In this corresponding, we consider a multi frequency radar that employs an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal. The advantage of OFDM radar signaling has been well established in various algorithms, such as improved wideband ambiguity function.

2-Methodology

We consider on OFDM signaling system.

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M}\left[\sum_{p=0}^{P-1} a_{p,m}\exp\left(j2\pi f_p t\right)\right] s(t-(m-1)t_c) \quad (1)$$

Where

$$S(t) = \begin{cases} 1, 0 \le t < tc \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (2)$$

and $f_p = \frac{p}{t_c}$, p=0,1,…,P-1 denotes the subcarrier frequency. The subcarrier distance is equal to the inverse of the chip duration, forming OFDM. In this paper 5 carriers are used (P=5), and the consecutive ordered cyclic shift of a p4 code with length 5 has been used to modulate these five carriers. The phase vector of p4 code that is used is given by:

$$a = [0^\circ - 144^\circ - 216^\circ - 216^\circ - 144^\circ] \quad (3)$$

Detection of a target in an echo-location system is often accomplished through the use of a matched filter receiver. after sampling the received signal, it is correlated with a template. The match filter is the optimal linear filter for maximizing the signal to noise ratio (SNR) in the presence of additive Gaussian noise. To study the performance of matched filter, we separately considered two different scenarios: In the first scenario there is a constant target cross section. In the second one we account for variations in the target cross section (a Rayleigh fluctuating target). Swerling classified the temporal autocorrelation of a fluctuating target in the terms of its decorrelation time relative to the pulse repetition interval and scan interval of the subject radar. The complex envelope of the received signal is given by:

$$y[n] = \sum_{p=0}^{p-1}\sum_{m=1}^{M} x_p[n]a_{p,m}\, exp\left(j2\pi\frac{np}{NP}\right) s\left(\frac{nt_c}{NP} - (m-1)t_c\right) + e[n] \quad (4)$$

Where $x_p[n]$ is a complex Gaussian random variable whose envelope has a Rayleigh distribution representing a Rayleigh fluctuating target. $x_p[n]$ is assumed uncorrelated from pulse to pulse, that stands for Swerling II target return. e[n] is the additive white Gaussian noise. The performance of the matched filter will be evaluated by simulation mainly focusing on a Rayleigh fluctuating target. Target fluctuation lowers the probability of detection for matched filter algorithm. another method for the realization of the matched filter is presented to compress the OFDM signal. To calculate the matched filter output in each sample time, first the last received NPM samples are divided into M segments each containing NP samples.

$$[x[n-NPM+1]x[n-NPM+2]\ldots x[n]] = [x_1 x_2 \ldots x_M] \quad (5)$$

where

$$X_i = [x[n-(M-i+1)NP+1] \; x[n-(M-i+1)NP+2] \; \ldots x[n-(M-i+1)NP+NP]] \quad (6)$$

Then the FFT of length NP is computed for each segment.

$$F_{X_I} = FFT(X_i) \quad (7)$$

The first P samples of each FFT are demultiplexed and the resulting P sequences are filtered by P different conventional single carrier pulse compression filters that are matched to the codes modulated on each sub carrier respectively.

$$S_P = \sum_{i=1}^{M} Fx_i(P)a_{p,i}^* \quad (8)$$

At the end, different channels data are added in order to compute the final output for the given sample time.

$$y[n] = \sum_{p=1}^{p} S_p \quad (9)$$

This operation is performed sequentially by sliding on all of the sample times.

For Rayleigh Fluctuation targets, instead of using just FFT, if we use an absolute, we will have an improvement in the detection of the target.

3-Results and discussion

For Rayleigh Fluctuation targets, instead of using equation (9), if we sum the absolute of S_p we will have an improvement in the detection of the target. More precisely

$$y[n] = \sum_{P=1}^{P} |S_P| \quad (10)$$

We propose a reduced complexity detection algorithm of OFDM signals. We will show that this new algorithm has better performance compared to matched filter. For a constant False alarm probability if we compute Detection probability as a function of signal to noise ratio (SNR), the better performance of the proposed algorithm is determined. The other advantage of our method is the reduction of computational complexity in comparison with matched filter.

4- Conclusion

It is shown that a match filter (MF) is not suitable for a Rayleigh fluctuating target, then for such targets a new approach was presented, that operates on the sub carriers instead on the hole OFDM signal. This sub carrier based processing offers a considerable improvement of OFDM radar performance and has lower computational complexity compared to the MF. Future research will explore alternative fluctuating targets in OFDM radars.

Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

رادار OFDM برای آشکار کردن اهداف با اعوجاج رایلی در نویز گوسی

محبوبه اقتصاد*

گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (mah_ehgtesadi@yahoo.com)

چکیده: این مقاله به بررسی روش‌هایی برای آشکارسازی اهداف در رادار مدولاسیون تقسیم فرکانس عمودبرهم می‌پردازد. در ابتدا مدل هدف و نویز گسسته گوسی معرفی می‌شوند. سپس برای آشکارسازی هدف از فیلتر منطبق استفاده می‌شود و نشان داده می‌شود که فیلتر منطبق برای اهداف ساده خوب عمل می‌کند؛ اما در مورد اهدافی که اعوجاج رایلی دارند عملکرد فیلتر منطبق به شدت افت می‌کند. در این مقاله چکیده روشی جدید بر اساس تبدیل فوریه سریع برای چنین اهدافی ارائه می‌شود. این روش که بار محاسباتی کمتری نسبت به فیلتر منطبق دارد، دارای عملکرد بهتری در آشکار کردن هدف می‌باشد. اثربخشی رویکرد پیشنهادی هم به صورت تئوری و هم با استفاده از تحلیل‌های شبیه‌سازی، نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: نرخ هشدار کاذب ثابت، فیلتر منطبق، تبدیل فوریه سریع، رادار مدولاسیون تقسیم فرکانس عمودبرهم (OFDM)، هدف با اعوجاج رایلی.

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶ تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰
DOI: 00.00000/0000

۱- مقدمه

حد تفکیک بالا در رادار، از جمله ویژگی‌های رادارهای مدرن امروزی به شمار می‌آید. در واقع رادارهای مرسوم که دارای حد تفکیک کمی می‌باشند فقط قادر به کشف هدف و اندازه‌گیری موقعیت آن با دقت نسبتا کمی بوده و نمی‌توانند تصویری را از هدف ایجاد نموده و هدف را تشخیص دهند. بنابراین همیشه دستیابی به قدرت تفکیک بالا چه در فاصله و چه در فرکانس داپلر در کاربردهای راداری مورد بحث و توجه بوده و گام‌های زیادی نیز برای نیل به این هدف برداشته شده است. افزایش حد تفکیک رادار در برد از طریق افزایش پهنای بلند سیگنال ارسالی آن میسر می‌شود. با استفاده از پالس‌های بسیار باریک قدرت تفکیک مطلوب در فاصله برآورده می‌شود، اما مشکل اساسی در این روش این است که با باریکتر شدن عرض پالس، از یک طرف انرژی ارسالی کم شده که نیازمند توان قله ارسالی بالا می‌باشد و از سوی دیگر قدرت تفکیک در فرکانس داپلر به همان نسبت کمتر خواهد شد. از جمله تکنیک‌هایی که می‌توان برای این منظور استفاده کرد روش‌های مرسوم مدولاسیون فاز و یا فرکانس در پالس ارسالی می‌باشد. اما افزایش پهنای باند در سیگنال مدوله شده فاز[2] معادل با کاهش عرض چیپ[3] بوده که کاهش بیش از حد عرض چیپ با محدودیت‌های تکنولوژیک مواجه می‌شود. راهکاری که برای غلبه بر این مشکل ارائه می‌شود استفاده از سیگنال‌های چند حاملی است.

در این راستا مدولاسیون تقسیم فرکانس عمودبرهم (OFDM[4]) به عنوان یکی از روش‌های کارامد جهت افزایش حد تفکیک رادار معرفی شده است. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص رادارهای OFDM صورت گرفته که عمدتا شامل مباحث طراحی سیگنال، الگوریتم های پردازش و کاربردهای این رادار می‌باشد. از محورهای تحقیقاتی در خصوص پردازش سیگنال در رادارهای OFDM، بحث آشکارسازی اهداف در این رادارها است [۱]. در سیگنال چند حاملی OFDM می‌توان به نحو بهتری از پهنای باند در دسترس استفاده کرد و همچنین با انتخاب کدهای مناسب گلبرگ‌های فرعی تابع ابهام سیگنال تا حد مطلوبی کاهش پیدا می‌کند. ضمناً با پردازش ساده‌تری می‌توان اقدام به فشرده‌سازی آن نمود که این مسأله پایه بحث این مقاله می‌باشد. در این مقاله راداری با سیگنال ارسالی OFDM در نظر گرفته شده است [۲]. بسیاری ازکارهایی که تاکنون در این زمینه انجام شده محدود به آشکارسازی اهداف با ضرایب بازگشتی ثابت در حضور تداخلات گوسی است که تا حدود زیادی با واقعیت فاصله دارد. در این

* نویسنده مسئول

[2] phase code modulation (PCM)
[3] Chip width
[4] Orthogonal Frequency Division Multiplexing

مقاله هدف هرچه واقعی‌تر کردن پارامترهای موجود در مساله آشکارسازی اهداف در رادارهای OFDM می‌باشد. بنابراین مساله تموج هدف یا تغییر انعکاسات هدف در نظر گرفته شده است.

در سال‌های اخیر بر روی رادارهای OFDM تحقیقات وسیعی صورت گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به چند مورد زیر اشاره کرد. نشان داده می‌شود که در رادار OFDM می‌توان نرخ نمونه‌برداری سیگنال دریافتی را به نسبت تعداد زیر حامل‌ها کم کرد بدون اینکه بیشترین برد بدون ابهام برای تخمین موقعیت هدف کم شود [۳]. با استفاده از به‌کارگیری سیگنال OFDM در [۴] برای جلوگیری از کاهش نسبت سیگنال به نویز هدف‌های دور در رادارهای موج پیوسته تحقیقاتی انجام شده است. اگر بخواهیم تفکیک برد بالایی داشته باشیم, شکل موج‌های رادار مبتنی برسیگنال OFDM معمولاً به نرخ‌های نمونه‌برداری بالایی نیاز دارند. در مقابل، مقاله [۵] طرحی را پیشنهاد می‌کند که نرخ‌های نمونه‌برداری لازم را در فرستنده و گیرنده ثابت نگه می‌دارد و همزمان پهنای بلند لحظه‌ای سیگنال را در کانال رادار افزایش می‌دهد. مسأله دقت برد بالا و سرعت بدون ابهام بالا نیز در این مقاله مطرح شده است. نویسندگان در این مقاله روشی بر اساس افزایش همزمان پهنای باند لحظه ای سیگنال ارائه داده اند که نیاز به افزایش نرخ نمونه برداری سیگنال را از بین می‌برد. سیگنال‌های OFDM به بایاس فرکانس داپلر و اثرات چند مسیری حساس هستند، که به طور سنتی با پیش کدهای چرخه‌ای که قبل از هر نماد OFDM درج می‌شوند، جبران می‌شوند. این پیش کدهای چرخه ای متاسفانه باعث بالا رفتن تلفات انرژی در سیستم های ارتباطی می‌شوند و نیز پس از پردازش سیگنال رادار، اهداف کاذب را نیز تشکیل می‌دهند. برای رسیدگی به کاستی‌های OFDM معمولی، در [۶] یک سیستم ارتباطی مشترک راداری OFDM بدون پیش کدهای چرخه ای پیشنهاد می‌شود. این سیستم سیگنال پالس OFDM را به اهداف خاص ویا سیستم های ارتباطی ارسال می‌کند و پژواک ها را در بازه تکرار پالس دریافت می‌کند. با حذف پیش کدها، سیستم رادار می تواند پژواک ها را بدون اهداف شبح فشرده کند. از طریق نمونه‌برداری معقول که باید به طور قابل توجهی طراحی شود، سیستم‌های ارتباطی پالس OFDM را برای استخراج اطلاعات بدون تداخل بین نمادی در کلنال‌های چندمسیری تغییر می‌دهند. علاوه بر این، محدودیت‌های زمان، فرکانس و نمونه‌برداری روی سیستم تحلیل شده است.

قدرت آشکارسازی بالا از جمله ویژگی‌های رادارهای مدرن امروزی به شمار می‌آید. بنابراین همیشه بالا بردن احتمال آشکارسازی هدف در کاربردهای راداری مورد توجه بوده و همچنان هم در کانون توجه و بحث می‌باشد و گام‌های زیادی نیز برای نیل به این هدف برداشته شده است. بحث آشکارسازی هدف با استفاده از فیلتر منطبق روشی بسیار کارآمد است که در مقالات روز دنیا مشاهده می‌شود [۷]. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی رادار پسیو OFDM انجام شده است.در [۸] رادار آرایه متنوع فرکانس یک آفست فرکانس کوچک را در سراسر عناصر آرایه فرستنده مجاور خود اعمال می‌کند تا یک الگوی پرتو وابسته به زاویه و برد ایجاد کند. افزایش درجه آزادی در حوزه برد می‌تواند به بهبود عملکرد رادار در تشخیص هدف، محلی سازی و حذف کلاتر کمک کند. رادار پسیو از سیگنال خارجی غیرقابل کنترل به عنوان روشنگر استفاده می‌کند، که استفاده از روش فرآیند متنوع فرکانس سنتی را دشوار می‌کند. با این حال، روشن‌کننده‌های شخص ثالث سیگنال OFDM تشعشع می‌کنند که معمولاً از چندین حامل مدوله‌شده با فاصله نزدیک تشکیل شده‌اند و در سال‌های اخیر به‌طور گسترده به عنوان روشن‌کننده برای رادار غیرفعال انتخاب شده‌اند. با در نظر گرفتن متعامد بودن بین زیرحامل‌های حتی جدا شده، یک روش فرآیند متنوع فرکانس جدیدی را با استخراج و پردازش هر زیرحامل داده‌های دریافتی به طور مستقل پیشنهاد می‌شود و تلاش می‌شود یک الگوی پرتو وابسته به زاویه برد برای رادار غیرفعال OFDM ارائه شود.

در این مقاله در بخش ۲ سیگنال OFDM معرفی می‌شود. در بخش ۳ یک فیلتر منطبق گسسته برای آشکار کردن هدف به کار می‌رود. دو نوع هدف، یکی هدف ساده و دیگری هدف با تموج رایلی در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند. فرض می‌شود که برای هدف متموج ضرایب انعکاس از یک حامل به حامل دیگر مستقل است و نیز در قطاری از پالس‌ها از یک پالس تا پالس دیگر مستقل می‌ملند در حین اینکه خیلی سریع با تابع چگالی احتمال رایلی تغییر می‌کنند (مدل سوئر لینگ[1] نوع ۲). در بخش ۴ روش جدیدی برای فشرده‌سازی معرفی می‌شود و عملکرد آن با روش‌های معمول مقایسه می‌گردد. بخش ۵ به نتیجه‌گیری مقاله می‌پردازد.

۲- سیگنال OFDM

سیگنال معادل باند پایه که بر پایه مدولاسیون OFDM در مخابرات معرفی می‌شود، شامل چند سیگنال حامل متعامد می‌باشد که به صورت همزمان ارسال شده و هر حامل با یک دنباله M بیتی مجزا مدوله فاز می‌گردد، بطوریکه فاصله فرکانسی سیگنال‌های حامل برابر عکس عرض بیت می‌باشد. در این مقاله یک سیگنال OFDM با P زیر حامل در نظر گرفته می‌شود که هر زیر حامل M چیپ دارد. $a_{p,m}$ معرف ضریب مختلط سیگنال ارسالی برای زیر حامل pام و چیپ mام است. ضرایب $\{a_{p,m}\}$ برای m های مختلف از ۱ تا M برابر با رشته کدها به ازای حامل pام می‌باشند. پوش مختلط سیگنال ارسالی را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M}\left[\sum_{p=0}^{P-1} a_{p,m}\exp\left(j2\pi f_p t\right)\right] s(t-(m-1)t_c) \quad (۱)$$

که در آن

$$S(t) = \begin{cases} 1, 0 \le t < tc \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (۲)$$

t_c معرف عرض چیپ است و $f_p = \frac{p}{t_c}$ برای p=0,1,…,P-1 معرف فرکانس زیر حامل‌ها است. فاصله فرکانسی زیر حامل‌های مختلف برابر با عکس عرض چیپ است که باعث عمود بودن زیرحامل‌ها بر هم

[1] Swerling case II

می‌شود. در این مقاله P=5 است یعنی پنج زیر حامل وجود دارند. از یک کد P_4 با شیفت چرخشی به طول پنج برای مدوله کردن این پنج زیر حامل استفاده شده است. بردار فاز P_4 به‌صورت زیر می‌باشد:

$$a = [0° - 144° - 216° - 216° - 144°] \quad (۳)$$

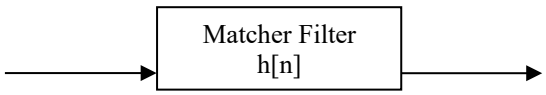
ایده اصلی در رادار OFDM ارسال داده‌ها به صورت موازی بر روی چند حامل متعامد با پهنای باند کم به جای ارسال داده‌ها به‌صورت سری بر روی یک حامل پهن باند می‌باشد.

۳- فیلتر منطبق برای آشکار کردن هدف

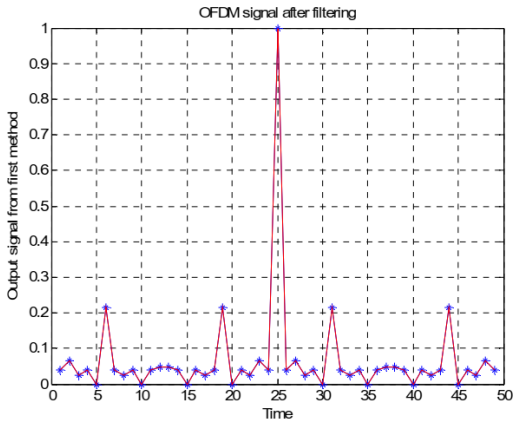
فیلتر منطبق، اغلب در آشکارسازی سیگنال به‌کار می‌رود. برای نمونه، اگر هدف یافتن فاصله یک جسم از راه بازتاب سیگنال از آن باشد؛ یک پالس سینوسی خالص یک هرتزی به‌سوی جسم گسیل می‌کنند. فرض می‌شود که سیگنال بازتابیده از جسم، نسخه‌ای ضعیف‌شده و تغییرفازیافته از سیگنال گسیل‌شده در کنار نویز جمع‌شونده باشد. برای یافتن فاصله جسم، پالس دریافت‌شده را با پاسخ ضربه یک فیلتر منطبق، هم‌بسته[1] می‌کنند، که آن هم در حضور نویز سفید ناهم‌بسته، سینوسی خالص یک هرتزی است. وقتی خروجی فیلتر از آستانه‌ای معین فراتر رود، با احتمال زیاد نتیجه گرفته می‌شود که سیگنال دریافت‌شده، از جسم بازتابیده است. با در نظر گرفتن سرعت انتشار موج و اختلاف زمان میان لحظه گسیل شدن سیگنال و لحظه آشکار شدن سیگنال در خروجی فیلتر، فاصله جسم تخمین زده می‌شود. اگر شکل پالس به روشی خاص تغییر داده شود، نسبت سیگنال به نویز و دقت تخمین فاصله پس‌از فیلتر کردن را می‌توان بهبود بخشید؛ این روشی است که فشرده‌سازی پالس نام دارد.

معمولاً آشکار کردن یک هدف در سیستمی که بر اساس انعکاس موج از هدف باشد با فیلتر منطبق یا محاسبه مستقیم تابع همبستگی انجام می‌شود. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بعد از نمونه‌برداری از سیگنال دریافتی، هم‌بستگی سیگنال حاصل و نمونه‌های سیگنال مرجع محاسبه می‌شود. فیلتر منطبق بهترین فیلتر خطی برای داشتن بیشترین توان سیگنال به نویز[2] در حضور نویز گوسی جمع شونده می‌باشد. فیلتر منطبق در رادار بسیار استفاده می‌شود، که در آن، سیگنال مشخصی گسیل می‌شود و سیگنال منعکس‌شده (دریافت‌شده) برای یافتن ویژگی‌های مشترک با سیگنال گسیل‌شده بررسی می‌شود. فشرده‌سازی پالس نمونه‌ای از کاربرد فیلتر منطبق در رادار است. در واقع پاسخ ضربه فیلتر گیرنده و سیگنال پالسی گسیل‌شده، برهم منطبق هستند. اگر از این سیگنال نمونه‌برداری شود، پاسخ ضربه فیلتر منطبق گسسته به‌دست می‌آید. در نتیجه خروجی فیلتر منطبق به‌صورت زیر می‌باشد که علامت * به معنی کانولوشن خطی است:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{K=-\infty}^{+\infty} x[k]\, h[x-k] \quad (۴)$$



شکل (۱): شمای گیرنده با فیلتر منطبق



شکل (۲): خروجی فیلتر منطبق برای سیگنال OFDM متشکل از پنج حامل و تاخیری برابرپنج سلول فاصل

برای مثال اگر در سیگنال OFDM از پنج حامل استفاده شده و شیفت یافته‌های چرخشی کد مطابق (۳) با طول ۵ روی این ۵ حامل مدوله گردیده باشد، خروجی فیلتر منطبق برای هدفی ساکن به صورت شکل (۲) خواهد بود.

برای مطالعه عملکرد فیلتر منطبق دو سناریوی مختلف بررسی شده است: در سناریوی نخست یک رادار OFDM با پنج زیر حامل یعنی P=5 فاصله فرکانسی $1/t_c = 1Hz$ و پنج چیپ در هر پالس M=5. ضریب انعکاس هدف ثابت است. پوش مختلط سیگنال دریافتی در یک سلول فاصله حاوی هدف پس از نمونه‌برداری بصورت زیر است:

$$y[n] = \sum_{p=0}^{p-1} \sum_{m=1}^{M} x\, a_{p,m} \exp\left(j2\pi \frac{np}{NP}\right) s\left(\frac{nt_c}{NP} - (m-1)t_c\right) + e[n] \quad (۵)$$

که در آن x به منزله ضریب انعکاس هدف می‌باشد. $e[n]$ هم نویز سفید گوسی جمع شونده است. در سناریوی قبل، هدفی ساده بدون اعوجاج در نظر گرفته شد. در اینجا هدفی با ضریب انعکاس متغییر شبیه‌سازی می‌شود. در عمل اکوی بازگشتی از اهداف یا در واقع RCS[3] هدف وابسته به فرکانس و زمان بوده که تغییرات ناشی از آنها تحت عنوان تموج هدف شناخته شده‌اند.

در رادارهای OFDM به‌دلیل اینکه توان بر روی چندین پالس در چند فرکانس ارسال می‌شود، تموج می‌تواند پالس به پالس یا فرکانس به فرکانس رخ دهد. به‌دلیل چند نقطه‌ای بودن اهداف، اکوی بازگشتی از آنها با اختلاف فازها و دامنه‌های مختلفی جمع می‌شوند که این اختلاف فازها به فرکانس و فاصله آنها از رادار وابسته است. این اختلاف فازها به طور مداوم عوض شده و مدل‌های آماری مختلفی را به صورت تصادفی ایجاد می‌کنند. اما در حالت کلی مقدار RCS بازگشتی از هدف دارای تابع چگالی احتمال Chi-square خواهد بود. سوئرلینگ

[1] correlate
[2] Signal-to-Noise Ratio (SNR)
[3] Radar Cross Section

همبستگی زمانی اهداف دارای اعوجاج را با توجه به زمان ناهمبستگی نسبت به PRI[1] و زمان اسکن شی توسط رادار دسته‌بندی کرد [۱۲].

سوئرلینگ نوع اول مدلی است که در آن RCS هدف مطابق با تابع چگالی احتمال کای اسکوئر[2] با دو درجه آزادی تغییر می‌کند در حالی که مقدار RCS آن در طول یک اسکن همواره ثابت می‌ماند. دراین حالت مقدار تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه زیر می‌شود.

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} e^{\frac{-\sigma}{\sigma_{av}}} \quad (۶)$$

که در آن σ مقدار RCS و σ_{av} مقدار میانگین RCSهدف را مشخص می‌کند. که این معادل است با توزیع رایلی برای دامنه سیگنال:

$$p(s,\sigma) = \frac{s}{\sigma^2} e^{\frac{-s^2}{2\sigma^2}} \quad (۷)$$

مدل سوئرلینگ نوع اول معرف یک متغیر تصادفی همبسته است که با تابع طیف توان مدل خواهد شد که پهنای بلند آن از ۳ تا ۳۰ هرتز بسته به اهداف مختلف متغیر خواهد بود. مدل سوئرلینگ نوع دوم از نظر توزیع آماری RCS هدف، شبیه مدل سوئرلینگ نوع اول است و تنها تفاوت آن در این است که مقدار RCS بازگشتی از پالسی به پالسی دیگر مستقل است. یک سناریو که سبب استقلال RCS نقاط منعکس کننده هدف می‌شود، تنوع فرکانسی است. بنابراین مدل سوئرلینگ نوع دوم برای رادارهایی با تغییر فرکانسی مانند رادارهای پالسی با یک فرکانس متفاوت بر روی پالس های مختلف و همچنین رادارهای OFDM با چندین فرکانس بر روی یک پالس، مناسب است. در رادارهای OFDM وقتی فاصله فرکانسی حامل ها زیاد می‌شود، RCS از فرکانسی به فرکانس دیگر مستقل خواهد شد.

در این قسمت عملکرد فیلتر منطبق برای یک هدف دارای اعوجاج رایلی با شبیه‌سازی بررسی می‌شود. پوش مختلط سیگنال دریافتی بصورت زیر می‌باشد:

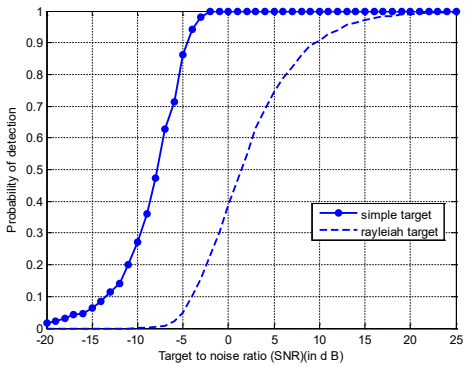
$$y[n] = \sum_{p=0}^{p-1} \sum_{m=1}^{M} x_p[n] a_{p,m} \exp\left(j2\pi \frac{np}{NP}\right) s\left(\frac{nt_c}{NP} - (m-1)t_c\right) + e[n] \quad (۸)$$

که در آن $xp[n]$ یک متغیر تصادفی مختلط گوسی است و اندازه‌ی آن توزیع رایلی دارد و معرف هدفی رایلی است. $xp[n]$ از یک پالس تا پالس دیگر ناهمبسته است و مدل سوئرلینگ نوع ۲ را دارد. $e[n]$ نویز سفید گوسی جمع شونده است.

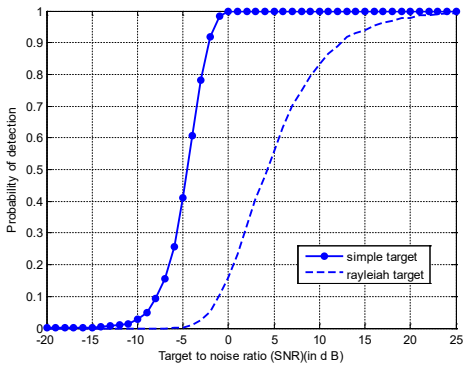
نمونه‌های نویز توزیع مختلط گوسی دارند و در ضریبی ضرب می‌شوند تا SNR دلخواه به‌وجود اید؛ که SNR به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SNR = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{NPM-1} (r^2 |x[n]|^2) \quad (۹)$$

r ضریب مورد نظر می‌باشد که باعث می‌شود SNR مطلوب به‌دست آید. شکل‌های (۳-۴) عملکرد فیلتر منطبق را در دو سناریوی هدف ساده و هدف دارای اعوجاج نشان می‌دهند و برای احتمال هشدار کاذب‌های متفاوت کشیده شده‌اند. در رسم این منحنی‌ها ابتدا به روش مونت‌کارلو حد آستانه برای مقایسه خروجی پردازشگر مشخص می‌شود.



شکل (۳): احتمال آشکارسازی برای $p_{fa} = 10^{-2}$



شکل (۴): احتمال آشکارسازی برای $p_{fa} = 10^{-4}$

برای این منظور ابتدا یک احتمال هشدار کاذب در نظر گرفته می‌شود. در حالت هشدار کاذب در سیگنال دریافتی رادار هدفی وجود ندارد و فقط نویز دریافت می‌شود. سپس عدد صد بر احتمال هشدار کاذب تقسیم می‌شود و به این تعداد الگوریتم اجرا می‌شود. فرض می‌شود که در صد مرتبه احتمال هشدار کاذب رخ دهد؛ پس خروجی‌های الگوریتم از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند و از روی داده صدم در یک احتمال هشدار کاذب حد آستانه برای مقایسه خروجی فیلتر منطبق مشخص می‌شود. برای محاسبه احتمال آشکارسازی از این حد آستانه استفاده می‌شود. در این دو شکل احتمال آشکارسازی برای هدف ساده و هدف دارای اعوجاج رایلی کشیده شده است. اعوجاج هدف باعث می‌شود که احتمال آشکارسازی در فیلتر منطبق به شدت افت کند.

۴-روش پیشنهادی برای آشکار کردن هدف دارای اعوجاج

تبدیل فوریه سریع (FFT[3]) یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده در پردازش سیگنال و تحلیل داده است. در واقع FFT یک الگوریتم است که برای محاسبه تبدیل فوریه گسسته و نیز معکوس آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش الگوریتمی برای آشکارسازی اهداف متموج پیشنهاد می‌شود که برای سیگنال‌های OFDM پیاده‌سازی می‌شود. بار محاسباتی کمتری نسبت به فیلتر منطبق و

[1] Pulse Repetition Interval
[2] Chi-square
[3] Fast Fourier Transform

عملکرد بسیار بهتری دارد. تحلیل فوریه می‌تواند یک سیگنال از حوزه اصلی، که معمولا زمان یا فضا است را به نمایشی در حوزه فرکانس و نیز بلعکس تبدیل کند. تبدیل فوریه گسسته از طریق تجزیه دنباله مقادیر، به عناصر با فرکانس‌های متفاوت محاسبه می‌شود. این تبدیل در بسیاری از رشته‌ها مفید است، اما مشکلی که وجود دارد این است که محاسبه مستقیم این تبدیل با استفاده از تعریف آن بسیار کند است و در عمل کاربردی ندارد. تبدیل فوریه سریع یا FFT روشی است که به وسیله آن می‌توان تبدیل فوریه گسسته را به سرعت محاسبه کرد.

در [۱۲] روشی برای پیاده‌سازی فیلتر منطبق طبق (۴) ارائه شده است و این روش برای سیگنال OFDM به کار برده می شود. این روش که در شکل (۵) به خوبی نشان داده شده است عملکردی کاملا مشابه با فیلتر منطبق دارد. بر اساس [۱۲]، برای محاسبه خروجی فیلتر منطبق در هر زمان نمونه‌برداری، بر روی NPM نمونه آخر پردازشی انجام می‌شود؛ که در آن N یک عدد طبیعی است. بدین ترتیب که NPM نمونه آخر به M قسمت که هر کدام دارای NP نمونه هستند تقسیم می‌شوند.

$$[x[n-NPM+1]x[n-NPM+2]\dots x[n]] = [x_1 x_2 \dots x_M] \quad (۱۰)$$

که در آن

$$X_i = [x[n-(M-i+1)NP+1] \; x[n-(M-i+1)NP+2] \; \dots x[n-(M-i+1)NP+NP] \quad (۱۱)$$

سپس بر روی هر کدام از نمونه‌ها به طول NP مطابق شکل (۵) یک FFT با طول NP گرفته می‌شود.

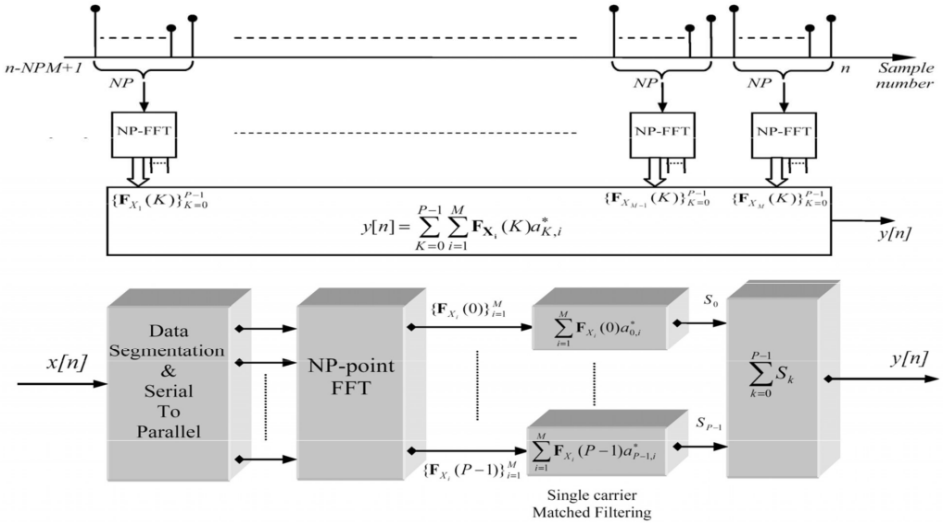
$$F_{X_I} = FFT(X_i) \quad (۱۲)$$

P خروجی اول FFTها بیانگر اطلاعات مدوله شده روی هر یک از حامل‌ها (در صورت صحیح بودن عدد N) می‌باشد. سپس اطلاعات دمدوله شده از هر حامل به فیلتر منطبقی که مبتنی بر کد مدوله شده روی هر حامل می‌باشد عبور داده می‌شود یا به عبارتی عملیات فشرده‌سازی روی هر کانال فرکانسی به صورت مجزا انجام می‌پذیرد.

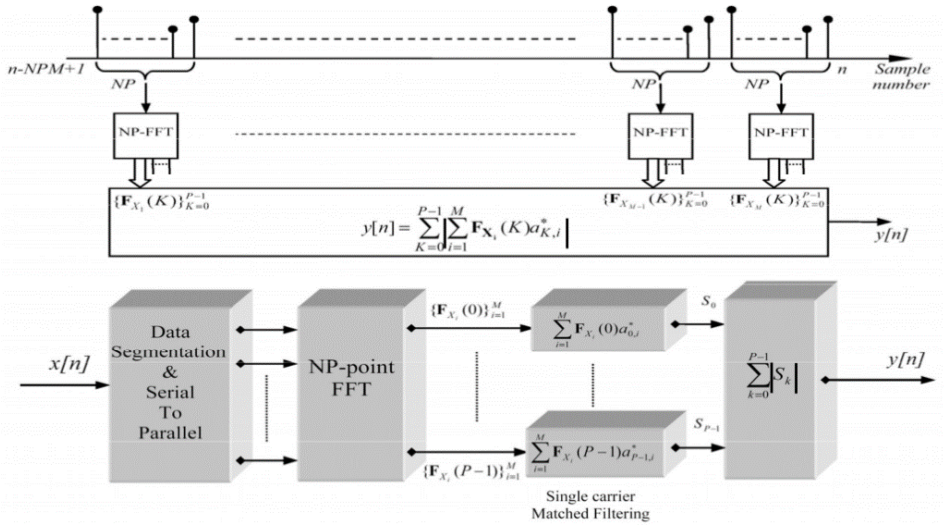
$$S_P = \sum_{i=1}^{M} Fx_i(P) a_{p,i}^* \quad (۱۳)$$

در نهایت اطلاعات کانال‌های مختلف با هم‌دیگر جمع می‌شوند تا خروجی نهایی در لحظه nام حاصل گردد.

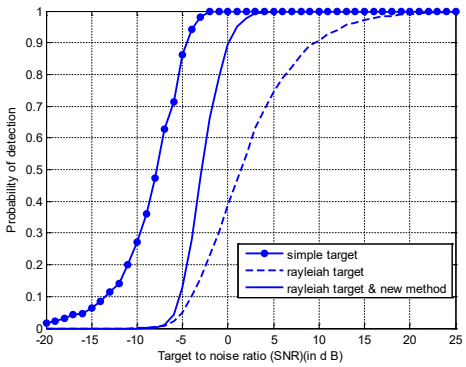
$$y[n] = \sum_{p=1}^{p} S_p \quad (۱۴)$$



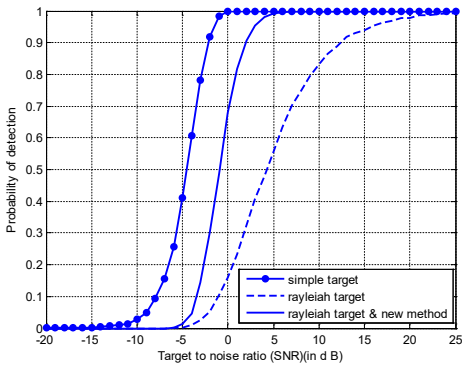
شکل (۵): شمای فیلتر منطبق برای فشرده کردن سیگنال OFDM



شکل (۶): شمای الگوریتم پیشنهادی برای فشرده کردن سیگنال OFDM



شکل (۷): افزایش احتمال آشکارسازی برای $p_{fa} = 10^{-2}$



شکل (۸): افزایش احتمال آشکارسازی برای $p_{fa} = 10^{-4}$

جدول (۱): بهبود در SNR برای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با فیلتر منطبق برای $p_{fa} = 10^{-2}$

احتمال آشکار سازی هدف	SNR(dB)	
	فیلتر منطبق	الگوریتم ارائه شده
۰.۹	۹	۰
۰.۸	۷	-۱
۰.۷	۴	-۲
۰.۵	۲	-۳
۰.۳	-۱	-۴

جدول (۲): بهبود در SNR برای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با فیلتر منطبق برای $p_{fa} = 10^{-4}$

احتمال آشکار سازی هدف	SNR(dB)	
	فیلتر منطبق	الگوریتم ارائه شده
۰.۹	۱۲.۵	۲
۰.۸	۹	۱
۰.۷	۷	۰
۰.۵	۴	-۱
۰.۳	۲	-۲

این عمل به صورت لغزنده و پی‌درپی برای سایر لحظات زمانی (n) هم انجام می‌شود. اگر الگوریتم فوق را برای یک سیگنال OFDM به کار ببریم، نتیجه عیناً با فیلتر منطبق یکسان خواهد بود. برای اهدافی که اعوجاج رایلی دارند اگر به جای جمع SPها در (۱۴) مطابق شکل (۶) قدر مطلق آن‌ها با هم جمع شوند، نتیجه بهتری بدست می‌آید.

$$y[n] = \sum_{P=1}^{P} |S_P| \qquad (۱۵)$$

شکل‌های (۷-۸) احتمال آشکار کردن هدف را به عنوان تابعی از SNR نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود روش پیشنهادی این مقاله عملکردی به مراتب بهتر نسبت به فیلتر منطبق دارد. ویژگی مهم روش پیشنهادی جهت آشکارسازی اهداف رایلی این است که اولاً عملکرد بسیار بهتری نسبت به فیلتر منطبق دارد و ثانیاً بار محاسباتی آن کمتر از روش فیلتر منطبق است. همانطور که گفته شد در این روش امکان تخمین کانال و استفاده از آن جهت مدیریت جدول توان در شرایط وجود تموج وابسته به فرکانس اهداف ایجاد می‌شود. جداول (۲-۱) نشان می‌دهند که برای داشتن احتمال آشکارسازی یکسان برای هدف متوج، فیلتر منطبق به چه اندازه به SNR بیشتری نسبت به روش ارائه شده در این مقاله نیاز دارد.

۵-نتیجه گیری

در این مقاله پس از معرفی سیگنال‌های OFDM جهت استفاده در رادار و بیان روش مرسوم فیلتر منطبق در آشکارسازی اهداف برای این رادار، نشان داده شد که فیلتر منطبق برای اهداف با تموج رایلی عملکرد بسیار پایینی دارد؛ سپس برای چنین اهدافی روشی جدید معرفی شد. این روش به جای کل سیگنال OFDM بر روی حامل‌های سیگنال OFDM پردازش انجام می‌دهد. پیاده‌سازی الگوریتم ارائه شده مبتنی بر FFT و جداسازی سیگنال کانال‌های فرکانسی مختلف می‌باشد و نسبت به فیلتر منطبق منجر به بهبود چشم‌گیر عملکرد رادار در آشکارسازی اهداف می‌شود. همچنین بار محاسباتی روش جدید از فیلتر منطبق کمتر است. در راستای زمینه‌های کاری در آینده می‌توان تاثیر تنوع فرکانسی و یا اثر افزایش تعداد پالس‌ها یا زمان مشاهده هدف را بر روی عملکرد آشکارسازی بررسی کرد. آشکارسازی در رادارهای OFDM زمینهٔ نو بنیادی می‌باشد و فضای مناسبی برای انجام کارهای تحقیقی و نوآوری را در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. طراحی انواع آشکارسازها در حضور کلاترها با توزیع های مختلف می‌تواند زمینه خوبی برای کارهای تحقیقاتی باشد. به خصوص با ارائه مدل‌های سیگنالینگ جدید برای سیگنال OFDM می‌توانند جایگاه خود را خیلی سریع در بین محققین این زمینه پیدا کنند. همانطور که می‌دانیم یک محیط چندمسیری، به عنوان مثال یک محیط شهری تنها بازتاب‌های چند مسیری خاصی را شامل نمی‌شود بلکه انکسارها و میرایی هایی وابسته به لبه‌های تیز و گوشه‌های ساختمان و یا پشت بام‌ها نیز به‌وجود خواهد آمد. بنابراین وارد کردن این رفتارهای فیزیکی اساسی در مدل سیگنال به عنوان یک پدیده حقیقی امکان‌پذیر بسیار مهم خواهد بود. بنابراین در آینده برای حقیقی‌تر کردن پدیده‌های فیزیکی موجود در محیط، می‌توان مدل ارایه شده در این مقاله را گسترش داد و ساختار آشکارساز معادل با این مدل را بیان کرد. برای طراحی سیگنال‌های حقیقی‌تری که در کاربردهای راداری مناسب هستند، می‌توان محدودیت‌هایی در مساله بهینه‌سازی شکل موج اعمال کرد از جمله طراحی شکل موج وفقی و استفاده همزمان آن در آشکارسازی اهداف. تحت هر کدام از این شرایط، در صورت وجود

می‌توان ساختار آشکارساز معادل سیگنال طراحی شده را به‌دست آورد و عملکرد آن را تحت هر کدام از سناریوهای مذکور بیان کرد.

مراجع

[1] M. Mirabella, P.D. Viesti, A. DavolGiorgio, M. Vitetta" Deterministic Signal Processing Techniques for OFDM-Based Radar Sensing: An Overview", IEEE Access , Vol. 11, pp. 68872 – 68889, July.2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3292937

[2] Li, Hao. Principle of OFDM and multi-carrier modulations. In *Encyclopedia of Wireless Networks*, pp. 1093-1097. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-78262-1_164

[3] Kawon Han, Seonghyeon Kang, Songcheol Hong, "Sub-Nyquist Sampling OFDM Radar", *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 1, pp. 669-680, Nov. 2023. doi: 10.1109/TRS.2023.3333430

[4] J. T. Rodriguez, F. Colone, and P. Lombardo," Supervised Reciprocal Filter for OFDM radar signal processing," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, no. 4, August 2023.doi: 10.1109/TAES.2023.3235317

[5] B. Nuss, J. Mayer, S. Marahrens, T. Zwick "Frequency comb OFDM radar system with high range resolution and low sampling rate" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.68, Issue: 9, pp. 3861 - 3871 Sep. 2020. doi: 10.1109/TMTT.2020.2988254

[6] G. Liu, Y. Wang, W. Yang "Radar Sensor and Data Communication System Based on OFDM Without Cyclic Prefix" IEEE Sensors Journal, Vol. 23, Issue: 7, pp. 7578-7590 April 2023. doi: 10.1109/JSEN.2022.3229034

[7] A. Coluccia, A. Fascista, G. Ricci" Robust CFAR Radar Detection Using a K-nearest Neighbors Rule" IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2020. doi: 10.1109/ICASSP40776.2020.9054283

[8] Y. RAO, H. HE, X. WAN, J. YI" Range-Angle Dependent Beampattern Synthesis Method for OFDM-Based Passive Radar" Wuhan Univ. J. Nat. Sci.Volume 27, Number 3, 2022. doi: https://doi.org/10.1051/wujns/2022273255

[9] S. Sen and A. Nehorai," Sparsity-based multi-target tracking using OFDM radar," IEEE Trans. Signal Process., vol. 59, no. 4, pp.1902-1906, Apr. 2011. doi: 10.1109/TSP.2010.2103064

[10] A. F. Molisch, *Wideband Wireless Digital Communications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall PTR, 2001.

[11] Peng Yuan, Zulin Wang, Qin Huang, Yuanhan Ni, "Integrated Sensing and Communications System With Multiple Cyclic Prefixes", *IEEE Communications Letters*, vol.27, no.8, pp.2043-2047, 2023. doi: 10.1109/LCOMM.2023.3286985

[12] G. Morris, and L. Harkness, Airborne Pulse Doppler Radar, 2nd ed. Artech House,1996.