دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه مخابرات

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مخابرات گرایش سیستم

پردازش سیگنال در رادارهای چند حاملی متعامد بر پایه مدولاسیون بسته موجک

نگارش:

مصطفی علی مسیمر

استاد راهنما:

دکتر رضا محسنی

استاد مشاور:

دکتر صادق صمدی

دی ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

پردازش سیگنال در رادارهای چند حاملی متعامد بر پایه مدولاسیون بسته موجک

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

توسط:

مصطفی علی مسیمر

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه مخابرات دانشکده مهندسی برق و الکترونیک
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: عالی

دکتر رضا محسنی استادیار در رشته مخابرات سیستم (استاد راهنما)
دکتر صادق صمدی استادیار در رشته مخابرات سیستم (استاد مشاور)
دکتر محمد جواد دهقانی دانشیار در رشته مخابرات سیستم (داور)
دکتر محسن اسلامی استادیار در رشته مخابرات سیستم (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب مصطفی علی مسیمر دانشجوی رشته مهندسی برق-مخابرات سیستم مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۸۹۱۱۴۰۱۷

تأیید می نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف ، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مصطفی علی مسیمر

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر رضا محسنی

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

وجود با برکت پدر و مادر عزیزم

که همواره حامی و مشوق من

در طول تحصیل و زندگی بوده اند.

سایه شان بر قرار ...

تشکر و قدردانی:

منت خدای را عز و جل که طاعتش موجب نعمت است و به شکر اندرش مزید نعمت ....

اکنون که این پایان نامه به پایان رسیده است برخود لازم می دانم که مراتب تقدیر و تشکر خود را از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر رضا محسنی که با راهنمایی های ارزنده و رفتاری نیکو، راهنمای من در انجام این پایان نامه بوده اند بیان دارم. بی شک بارها خدای بزرگ را جهت فراهم آمدن توفیق شاگردی این استاد بزرگ، شکر گزار بوده ام.

همچنین از جناب آقای دکتر صادق صمدی که در انجام این پایان نامه به عنوان استاد مشاور یاری گر من بودند، کمال امتنان را دارم.

همچنین لازم می دانم که از اساتید محترم گروه ریاضی، آقایان دکتر فخار زاده و هاشمی و دوست همراهم، آقای مهندس علی عزیزی واحد که با مشاوره های ارزنده خود، در بهبود این پایان نامه نقش شایان توجهی داشته اند بیان دارم.

در پایان، نگارنده این پایان نامه مراتب تقدیر و تشکر خود را از موسسه تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات (ITRC) به خاطر حمایت از این پایان نامه بیان می دارد.

چکیده

پردازش سیگنال در رادارهای چند حاملی متعامد بر پایه مدولاسیون بسته موجک

به وسیله:

مصطفی علی مسیمر

در چند سال گذشته بحث استفاده از سیگنال های چند حاملی متعامد در سیستم های راداری مطرح شده است. این سیگنال ها دارای خاصیت ذاتی تفکیک پذیری بالا، مقاومت در برابر جنگ الکترونیک و پایداری آشکارسازی بهتر می باشند که همگی از مواردی مطلوب برای یک سیستم راداری به حساب می آیند.

در این پایان نامه به طراحی سیگنال های چند حاملی مبتنی بر مدولاسیون بسته موجک متعامد می پردازیم. در مساله طراحی سیگنال، دو معیار را مدنظر قرار داده ایم که اولین آن، بهینگی از لحاظ عملکرد آشکار سازی در حضور نویز گوسی رنگی با ماتریس کواریانس معلوم است و دیگری مناسب بودن شکل تابع ابهام با کیفیت فشرده سازی سیگنال می باشد. این شیوه رهیافت طراحی سیگنال راداری منجر به طرح یک مساله بهینه سازی می شود. در فرآیند حل مساله طراحی سیگنال خود از روش های مختلفی از جمله روش ضرایب لاگرانژ، تجزیه به مقدار ویژه-بردار ویژه و همچنین الگوریتم های تکاملی بهره خواهیم برد.

جهت ارزیابی سیگنال طراحی شده نیز مشخصه های متنوعی از جمله: تابع ابهام، تابع خود همبستگی سیگنال، منحنی ROC، منحنی پرتو (Pareto) مساله بهینه سازی و چگالی طیف توان سیگنال را بررسی خواهیم نمود.

واژه‌های کلیدی: طراحی سیگنال راداری، تابع ابهام، آشکارسازی، بهینه سازی، الگوریتم های تکاملی.

فهرست مطالب

۱. فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات انجام شده ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- سیگنال های راداری OFDM مبتنی بر مدولاسیون بسته موجک ۴

۱-۳- مشخصه های بهینگی طراحی سیگنال های چند حاملی ۷

۱-۳-۱-تابع ابهام ۸

۱-۳-۲-چگالی طیف توان ۹

۱-۳-۳-نسبت توان قله به توان متوسط سیگنال ارسالی ۱۰

۱-۴- تحقیقات انجام گرفته در زمینه طراحی سیگنال های راداری ۱۱

۱-۴-۱-طراحی سیگنال های راداری OFDM و WPM-OFDM جهت حصول به مشخصه های مطلوب ۱۲

۱-۴-۲-مزایای بکارگیری سیگنال های چند حاملی متعامد در سیستم راداری ۱۸

۱-۴-۳-بررسی کاربرد سیستمی استفاده از سیگنال های چند حاملی متعامد ۱۹

۱-۵- ساختار پایان نامه و اهداف آن ۲۰

۲.فصل دوم: بهینه سازی تابع ابهام به روش حداقل سازی مربع خطا ۲۱

۲-۱- مقدمه ۲۲

۲-۲- سنتز تابع ابهام با استفاده از معیار حداقل مربعات ۲۲

۲-۳-الگوریتم تطبیق فاز ۲۵

۲-۴- به کارگیری روش سنتز تابع ابهام در طراحی سیگنال های WPM-OFDM ۲۷

۲-۴-۱- مدل سازی مساله ۲۸

۲-۴-۲- بدست آوردن توابع یکه متعامد $f_i(t)$ ۲۹

۲-۵- نتایج شبیه سازی ۳۰

۲-۶- طراحی فیلتر غیر منطبق برای سیگنال های WPM-OFDM ۳۵

۲-۷- نتایج شبیه سازی ۳۸

۲-۸- نتیجه گیری ۴۰

۳.فصل سوم: طراحی سیگنال جهت بهینگی عملکرد آشکارسازی ٤١

۳-۱-مقدمه ۴۲

۳-۲- معرفی مدل سیستمی ۴۳

۳-۳- محاسبه آماره آزمون و عملکرد آشکارسازی ۴۵

۳-۴- تعریف مساله بهینه سازی و ارائه حل آن..... ۴۷
۳-۵- رسم منحنی ROC برای آشکارسازی به کمک GMF..... ۴۸
۳-۶- نتایج شبیه سازی..... ۴۹
۳-۷- نتیجه گیری..... ۵۲

۴.فصل چهارم: بهینه سازی توام عملکرد آشکارسازی و شکل تابع ابهام ۵۳
۴-۱- مقدمه..... ۵۴
۴-۲- مفاهیم بهینه سازی چند هدفه..... ۵۵
۴-۳- تعریف مساله بهینه سازی..... ۵۹
۴-۳-۱- بهینه سازی تابع ابهام..... ۵۹
۴-۳-۲- بهینه سازی عملکرد آشکارسازی ۶۱
۴-۳-۳- مساله بهینه سازی توام..... ۶۱
۴-۴- حل مساله..... ۶۲
۴-۵- نتایج شبیه سازی..... ۶۷
۴-۶- نتیجه‌گیری..... ۷۰

۵. فصل پنجم: استفاده از الگوریتم تکاملی انبوه ذرات در طراحی سیگنال راداری ۷۱
۵-۱- مقدمه..... ۷۲
۵-۲- الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات..... ۷۳
۵-۲-۱- مبانی الگوریتم..... ۷۳
۵-۲-۲- کاربردها ۷۵
۵-۲-۳- پیاده سازی الگوریتم ۷۶
۵-۳- تعریف مساله بهینه سازی..... ۷۸
۵-۴- نتایج شبیه سازی..... ۸۰
۵-۴-۱- پارامترهای مساله..... ۸۰
۵-۴-۲- نتایج..... ۸۰
۵-۵- استفاده از الگوریتم PSO چند هدفه در طراحی سیگنال راداری..... ۸۳
۵-۶- نتیجه گیری..... ۸۵

٦.فصل ششم: جمع بندی، نتیجه گیری و ارایه پیشنهاداتی جهت ادامه کار ۸٦
۶-۱- جمع بندی..... ۸۷
۶-۲- زمینه های تحقیقاتی آینده..... ۸۸

مراجع ۹۰

فهرست شکل‌ها

شکل (۱- ۱) : پیاده سازی فرستنده سیگنال WPM-OFDM..... ۶
شکل (۱- ۲) : پیاده سازی بلوک IDWPT به کمک بلوک های Up-Sampler و فیلتر های QMF..... ۶
شکل (۱- ۳) : تقسیم طیف فرکانسی با استفاده از تجزیه سه سطحی به صورت یکنواخت به کمک تبدیل بسته موجک..... ۷
شکل (۱- ۴) : مقایسه چگالی طیف توان سیگنال چند حاملی با سیگنال تک حاملی..... ۹
شکل (۱- ۵) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده به کمک مجموعه کد های متمم جدول (۱-۱)... ۱۴
شکل (۱- ۶) : پوش مختلط سیگنال طراحی شده به کمک مجموعه کد های متمم جدول (۱-۱)..... ۱۴
شکل (۱- ۷) : تابع خود همبستگی سیگنال طراحی شده به کمک مجموعه کد های متمم جدول (۱-۱)..... ۱۵
شکل (۱- ۸) : چگالی طبف توان سیگنال طراحی شده به کمک مجموعه کد های متمم جدول (۱-۱)..... ۱۵
شکل (۱- ۹) : بررسی اثر بهبود عملکرد آشکارسازی رادارهای OFDM نسبت به افزایش زیر حامل ها..... ۱۶
شکل (۱- ۱۰) : منحنی PSL و PAPR سیگنال طراحی شده به روش وزن دهی فرکانسی به ازای مقادیر مختلف α..... ۱۷
شکل (۱- ۱۱) : تابع خود همبستگی سیگنال طراحی شده به روش وزن دهی فرکانسی..... ۱۸
شکل (۱- ۱۲) : مقایسه عملکرد آشکارسازی سیگنال OFDM و LFM..... ۱۸
شکل (۲- ۱) : شیوه بدست آوردن توابع یکه متعامد ویولتی در چیپ اول..... ۳۰
شکل (۲- ۲) : نمایش توابع یکه متعامد ویولتی در چیپ اول..... ۳۰
شکل (۲- ۳) : تابع ابهام ایده آل پیش فرض با فرم ضربه ای..... ۳۱
شکل (۲- ۴) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده قبل از اعمال الگوریتم تطبیق فاز..... ۳۲
شکل (۲- ۵) : الف : همگرایی مقدار $\lambda_{\max}$؛ ب: کاهش مقدار خطای نتیجه شده در هر تکرار... ۳۳
شکل (۲- ۶) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده بعد از اعمال الگوریتم تطبیق فاز..... ۳۳
شکل (۲- ۷) : پوش مختلط سیگنال طراحی شده..... ۳۴

شکل (۲- ۸) : مقایسه توابع خود همبستگی سیگنال های WPM-OFDM و OFDM با طول یکسان..... ۳۴
شکل (۲- ۹) : تابع ابهام متقابل سیگنال های طراحی شده قبل از اعمال الگوریتم تطبیق فاز..... ۳۸
شکل (۲- ۱۰) : افزایش مقدار $\lambda_{\max}$ به کمک الگوریتم تطبیق فاز جهت کاهش خطا..... ۳۹
شکل (۲- ۱۱) : تابع ابهام متقابل سیگنال های طراحی شده بعد از اعمال الگوریتم تطبیق فاز..... ۳۹
شکل (۳- ۱) : منحنی هیستوگرام دنباله ای تولیدی گوسی..... ۵۰
شکل (۳- ۲) : تابع خود همبستگی دنباله رنگی گوسی تولیدی..... ۵۰
شکل (۳- ۳) : منحنی ROC برای کدهای یکنواخت، P3 و کد طراحی شده (کد محک)..... ۵۱
شکل (۳- ۴) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده به روش بهینه نمودن عملکرد آشکارسازی..... ۵۲
شکل (۴- ۱) : نمایش مفهوم غلبه شدن نقاط پرتو..... ۵۶
شکل (۴- ۲) : الگوریتم محاسباتی مجموعه نقاط پرتوی مساله (۴-۱۳)..... ۶۶
شکل (۴- ۳) : تاثیر مقدار ε انتخابی بر توابع ابهام سیگنال های طراحی شده..... ۶۷
شکل (۴- ۴): تابع خود همبستگی سیگنال های طراحی شده به ازای مقادیر مختلف ε..... ۶۸
شکل (۴- ۵): منحنی PAPR سیگنال های طراحی شده به ازای مقادیر مختلف ε..... ۶۸
شکل (۴- ۶) : منحنی پرتوی بدست آمده به ازای $\varepsilon = 0.75$ و $\gamma \in [0.1\ 5]$..... ۶۹
شکل (۴- ۷) : منحنی ROC سیگنال های طراحی شده به ازای مقادیر مختلف ε..... ۶۹
شکل (۵- ۱) : تعداد مقالات مرتبط با الگوریتم PSO به ترتیب سال..... ۷۶
شکل (۵- ۲) : الگوریتم تکاملی انبوه ذرات..... ۷۹
شکل (۵- ۳) : نمودار همگرایی خطا و هدف توسط الگوریتم PSO بعد از ۵۰ مرتبه تکرار..... ۸۱
شکل (۵- ۴) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده به کمک الگوریتم PSO..... ۸۲
شکل (۵- ۵) : مقایسه عملکرد آشکار سازی در دو حالت وجود و عدم وجود قید تابع ابهام..... ۸۲
شکل (۵- ۶) : منحنی پرتوی مساله بهینه سازی توام به کمک الگوریتم تکاملی چند هدفه PSO ۸۳
شکل (۵- ۷) : تابع ابهام سیگنال طراحی شده به کمک الگوریتم PSO چند هدفه..... ۸۴
شکل (۵- ۸) : مقایسه تابع خود همبستگی سیگنال های طراحی شده به روش های SOPSO و MOPSO..... ۸۴
شکل (۵- ۹) : مقایسه عملکرد آشکارسازی سیگنال های طراحی شده به روش های SOPSO و MOPSO و سیگنال بهینه از منظر آشکارسازی (فصل ۳)..... ۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۱- ۱) : مقادیر فاز (بر حسب درجه) مجموعه کد متمم مبتنی بر دنباله P3 طول ۸ ..... ۱۳
جدول (۵- ۱)-مقایسه مقدار خطای نتیجه شده در روش های مختلف ۸۱
جدول (۶- ۱) : مقایسه نتایج الگوریتم های پیشنهادی طراحی سیگنال WPM-OFDM..... ۸۸

فهرست کلمات اختصاری

AF	Ambiguity Function
ACF	Auto-Correlation Function
CAF	Cross Ambiguity Function
DOA	Direct Of Arrival
GLR	Generalized Likelihood Ratio
GMF	Generalized Matched Filter
GA	Genetic Algorithm
IDWPT	Inverse Discrete Wavelet Packet Transformation
LPI	Low probability of Intercept
MOEA	Multi-Objective Evolutionary Algorithm
MOO	Multi-Objective Optimization
MCPC	Multi-Carrier Phase Coded
MOPSO	Multi Objective Particle Swarm Optimization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSD	power Spectrum Density
PSL	Peak-to-Sidelobe Level
PAPR	Peak to Average Power Ratio
QMF	Quadrature Mirror Filter
ROC	Receiver Operating Characteristic
SAR	Synthetic Aperture Radar
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOPSO	Single Objective Particle Swarm Optimization
WPM	Wavelet Packet Modulation

فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات انجام شده

۱-۱-مقدمه

طراحی سیگنال های مناسب جهت کاربردهای راداری از مسائلی است که از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. پیشرفت های بزرگ در ساخت پردازنده های دیجیتال قدرتمند و سریع، ارائه مولد سیگنال های با قدرت انعطاف بالا و همچنین نیاز به داشتن عملکردی بهتر، موجب طرح مسایل و الگوریتم های مختلفی شده است که هدف آنها، طراحی و پردازش شکل موج های راداری جهت بهبود کارایی سیستم راداری می باشد [۱].

یکی از مهم ترین مشخصه های مطرح در زمینه پردازش سیگنال راداری، تفکیک پذیری در راستای برد و داپلر می باشد. منظور از تفکیک پذیری در راستای برد، حداقل فاصله بین دو هدف مختلف می باشد که پردازش‌گر رادار بتواند آنها را به صورت دو هدف متمایز از هم تشخص بدهد؛ لذا بهبود در تفکیک پذیری اهداف سبب عملکرد سیستم راداری می‌شود [۲].

فشرده سازی پالس این امکان را به ما می دهد که جهت حصول به متوسط توان ارسالی قابل قبول، یک پالس عریض که مدولاسیون فرکانس و یا فاز به آن اضافه شده است را ارسال نماییم و در گیرنده با فشرده سازی سیگنال دریافتی که با استفاده از فیلتر منطبق انجام می گیرد به تفکیک پذیری ای دست یافت که متناظر با ارسال یک پالس با عرض کوتاه می باشد [۳].

استفاده از تکنیک های فشرده سازی پالس مزیت های عمده ای را برای پردازش گر یک سیستم ایجاد می کند که از جمله آنها می توان به افزایش قابلیت آشکارسازی، افزایش قابلیت تفکیک فاصله، عدم لزوم به تولید توان پیک بالا و استفاده موثر و بیشتر از توان متوسط اشاره نمود. همچنین افزایش پیچیدگی سیستم و حجم پردازش (استفاده از فیلتر FIR با درجه زیاد)، افزایش حساسیت سیستم نسبت به جابجایی داپلر، اثرات منفی لوب های فرعی بر توان کلاتر و پوشیده شدن هدف های ضعیف توسط لوب های فرعی اهداف قوی را می توان به عنوان معایب روش فشرده سازی بیان نمود [۴].

بهبود در تفکیک پذیری سیگنال به دو عامل فرم زمانی سیگنال و همچنین کیفیت فشرده سازی سیگنال مربوط می باشد. در ارتباط با فرم زمانی سیگنال ارسالی، اولین راهی که برای این منظور به نظر می رسد استفاده از پالس های بسیار باریک تا حدی است که قدرت تفکیک مطلوب در راستای برد برآورده

شود؛ اما مشکل در این گونه سیگنال ها آن است که با هرچه باریکتر شدن عرض، پالس قدرت تفکیک در فرکانس به همان نسبت کمتر می شود.

برای غلبه بر این مشکل خانواده بزرگی از سیگنال های کد شده تک فرکانس به وجود آمد که علی رغم داشتن پهنای زمانی نسبتا عریض، پس از عبور از فیلتر منطبقشان، سیگنال خروجی به گونه ای خواهد بود که تفکیک پذیری به مراتب بهتری از عرض سیگنال اولیه ایجاد می نمایند.

اگر چه استفاده از این دسته سیگنال ها، رسیدن به تفکیک پذیری بالا در هر دو راستای برد و داپلر را میسر می سازند اما همچنان دو ایراد بر این گونه سیگنال ها وارد است. اول آنکه برای رسیدن به تفکیک پذیری های خیلی بالا نیاز به پالس هایی با عرض باریک می باشد که پیاده سازی آنها در عمل می تواند دشوار باشد و دوم آنکه طیف این دسته از سیگنال ها به شکل سینک[1] بوده و در نتیجه بازده پهنای باند[2] مناسبی ندارند؛ لذا می توان از خانواده دیگری از سیگنال ها استفاده نمود که علیرغم دستیابی به تفکیک پذیری بالا، از باریک شدن عرض چیپ ها نیز اجتناب می شود و در عین حال شکل طیف مستطیلی دارند که سیگنال های چند فرکانسه نمونه ای از پیاده سازی این دسته از سیگنال ها می باشند [۵].

یک نوع از این سیگنال ها که دارای خواص بسیار خوبی است سال ها پیش توسط کاستاس مطرح شد اما این دسته سیگنال ها در هر فاصله چیپ (chip) تنها از یک فرکانس استفاده می کنند؛ لذا بر خلاف چند فرکانسه بودنشان در هر بازه زمانی، تک فرکانسه هستند و از نظر ویژگیLPI[3] ، وضعیت مطلوبی ندارند؛ به علاوه گلبرگ های فرعی نسبتا بزرگی در تابع خود همبستگی خود دارند.

نوع دیگر سیگنال های کد شده چند فرکانسی، سیگنال MCPC[4] می باشد که اولین بار و به طور جدی تر توسط لوانن مورد بحث قرار گرفت که ایده آن برگرفته از مدولاسیون OFDM[5] در مخابرات دیجیتال بوده است [۳]. در این حالت نیز مشابه با سیگنال OFDM، سیگنال ارسالی شامل چند سیگنال حامل نمایی متعامد می باشد که به صورت همزمان ارسال شده و هر حامل با یک دنباله M بیتی مجزا مدوله فاز می گردد.

[1] Sinc

[2] Bandwidth Efficiency

[3] Low Probability of Intercept

[4] Multi Carrier Phase-Coded

[5] Orthogonal Frequency Division Multiplexing

معادل باند پایه یک سیگنال MCPC که دارای N حامل مختلف بوده و هر حامل توسط یک کد به طول M بیت مدوله فاز شده باشد مطابق رابطه زیر است:

$$x(t)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{N}a_{p,m}\exp(j\frac{2\pi p}{t_c}t)\,w\big(t-(m-1)t_c\big) \qquad (۱.۱)$$

که در آن:

$$w(t)=\begin{cases}1 & 0\le t<t_c\\ 0 & Otherwise\end{cases} \qquad (۲.۱)$$

دنباله $\{a_{p,m}\}_{m=1}^{M}$ در رابطه (۱-۱) دنباله کد روی حامل p ام بوده و t_c نیز عرض چیپ یا عرض بیت می باشد.

به مرور زمان و با بررسی مسایل پردازشی در کاربردهای مختلف، افق های جدیدی از کاربرد این مدولاسیون در سیستم های راداری مورد توجه قرار گرفت؛ به گونه ای که این دسته از سیگنال های چند حاملی به عنوان سیگنال پیشنهاد شده جهت کاربردهای راداری در آینده معرفی شده اند [۶]. این سیگنال ها دارای خاصیت تفکیک پذیری بالا می باشند و با توجه به امکان تحقق گوناگونی فرکانسی[1] چنانچه اطلاعات فرستاده شده در یک زیر باند مورد جنگ الکترونیک باند باریک[2] قرار بگیرد می توان با اطلاعات موجود در یک زیر باند مصون مانده نیز اطلاعات را بازیابی کرد که این خاصیت، مقاومت سیستم راداری در برابر جمینگ را افزایش می دهد و علاوه بر این می تواند سبب کاهش احتمال شنود راداری نیز بشود.

۱-۲-سیگنال های راداری OFDM مبتنی بر مدولاسیون بسته موجک

نمونه دیگری از سیگنال های چند حاملی متعامد که اخیرا معرفی شده اند، سیگنال چند حاملی مبتنی بر بسته موجک می باشد [۸-۷].

[1] Frequency diversity

[2] Narrow Band