فصلنامه علوم و فنون نظامی
سال شانزدهم، شماره ۵۲، تابستان ۱۳۹۹
صص ۵۰- ۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

بهبود امنیت سیگنالی رادار ثانویه با استفاده از فن‌آوری طیف گسترده دنباله مستقیم

جعفر خلیل پور*[۱]
محمد فرهمندراد[۲]

چکیده

رادارهای ثانویه ازجمله تجهیزات مهم در صنعت هوانوردی هستند. اساس کار این سامانه‌ها استفاده از سیستم پرسش و پاسخ در فرکانس باند L جهت شناسایی هواپیما است. در این مقاله طراحی یک سامانه رادار ثانویه، بر اساس معماری طیف گسترده دنباله مستقیم پیشنهاد می‌شود که هدف اصلی از ارائه این طرح افزایش مقاومت سامانه در برابر اختلال‌های نویزی و تجهیز سامانه رادار ثانویه به سیگنال‌های LPI است. بدین منظور در طرح پیشنهادی دو مد مختلف کاری تحت عنوان مد Z1 و Z2 ارائه می‌شود. روش اجرای عملی طرح بر اساس معماری طیف گسترده دنباله مستقیم بر پایه مدولاسیون BPSK است که سنکرون سازی اولیه آن بر اساس پالایه منطبق و سنکرون سازی نهایی به روش Split Bit (همانند لینک ۱۶) انجام می‌شود. در مد Z1 (به‌عنوان مد نرمال سامانه) با ارسال یک کلمه ۳۲ بیتی بهره پردازشی ۱۴/۹ dB حاصل می‌شود. همچنین در طراحی مد Z2 (که به‌عنوان مد ذخیره) با ارسال کلمه ۱۶ بیتی، بهره پردازشی ۲۱/۰۳ dB حاصل‌شده است. مد Z2 جهت استفاده در محیط نویزی در نظر گرفته‌شده است. نتایج حاصل از تحلیل سامانه نشان می‌دهد که در مد Z2 اثر اختلال به میزان ۹/۳۹ برابر نسبت به سامانه‌های مشابه موجود کاهش می‌یابد. نوآوری طرح پیشنهادی تبدیل رادار ثانویه به یک رادار با احتمال شنود پایین و مقاوم در برابر اختلال نویزی است.

واژه‌های کلیدی:

رادار ثانویه، طیف گسترده دنباله مستقیم، بهره پردازش، احتمال شنود پایین (LPI)

---

[۱]. دانشیار دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول: Email: j_khalilpour@yahoo.com
[۲]. پژوهشگر دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)، تهران، ایران.

مقدمه

طراحان سامانه‌های مخابراتی درگذشته و حال همواره به دنبال دستیابی به فن‌های مدولاسیون و دمدولاسیونی هستند که نیازهای مخابراتی و ملاحظاتی موردنظر آن‌ها را به بهترین صورت مرتفع سازند. اکثر این فن‌ها سعی در بهینه‌سازی استفاده از یک یا هر دو پارامتر اصلی ارزیابی عملکرد سامانه‌های مخابراتی یعنی توان و پهنای باند داشته و هدف اصلی آن‌ها کاستن از احتمال خطای ارسال سیگنال از یک محل به محل دیگر، با فرض حضور نویز است. بااین‌وجود گاهی نیاز به فن‌های مدولاسیونی که خواسته‌هایی غیر از موارد مذکور را برآورده کنند به چشم می‌خورد. به‌عنوان‌مثال علاوه بر کانال‌های شامل نویز سفید گوسی جمع شونده[۱]، کانال‌های دیگری وجود دارند که از این مدل تبعیت نمی‌کنند. مثلاً یک سیستم مخابرات نظامی که تحت تأثیر تداخل عمدی «اختلال»[۲] قرار می‌گیرد، یا کانال چندمسیره که به خاطر انتشار سیگنال از چند مسیر ایجاد می‌شود نمونه‌هایی از این کانال‌ها می‌باشند، لذا امروزه استفاده از فن‌های مدولاسیون با خواصی نظیر مقاومت در برابر اختلال، عملکرد در طیف انرژی پایین، دسترسی چندگانه بدون کنترل خارجی ایجاد کانال‌های سری بدون امکان شنود خارجی و ... به‌سرعت رو به افزایش است. یک روش مدولاسیون و دمدولاسیون که می‌تواند در این‌گونه موارد مناسب باشد فن طیف گسترده[۳] است. (Lei،۲۰۱۶: ۲۲)

در این تحقیق پیاده‌سازی طیف گسترده در رادار ثانویه موردبررسی قرار می‌گیرد. رادار ثانویه یکی از جدیدترین تجهیزات در صنعت هواپیمایی است که در اکثر کشورهای جهان مرسوم و متداول است .اساس کار رادار ثانویه با رادار اولیه متفاوت است، بدین‌صورت که رادار ثانویه به انعکاس امواج جهت شناسایی هواپیما متکی نیست .رادار ثانویه با استفاده از سیستم" تقاضا و پاسخ "کار می‌کند .بدین‌صورت که آنتن زمینی امواج را به‌عنوان تقاضا تولید کرده و می‌فرستد که موجب فعال شدن یک فرستنده خودکار[۴] دیگر در درون هواپیما می‌شود .فرستنده درون هواپیما به‌عنوان پاسخ، امواج الکترونیکی را برای ایستگاه زمینی می‌فرستد .این امواج می‌تواند کدبندی‌شده و برای استفاده در کنترل ترافیک هوایی مورد بهره‌برداری قرار گیرد .شایان‌ذکر است که به‌طورمعمول سایت ایستگاه زمینی برای فرستادن امواج از چهار مد بهره می‌برد؛ و همچنین

۱- Additive White Gaussian Noise

۲- Jamming

۳- Spread Spectrum

۴- Transponder

کد ارسال‌شده توسط هواپیما یک عدد ۴ رقمی بوده که قبل از پرواز در اختیار خلبان و ایستگاه رادار قرار می‌گیرد (Wei،۲۰۰۹:۱۲).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برحسب نحوه عملکرد رادارها را به دودسته رادار اولیه[۱] و رادار ثانویه SSR[۲] تقسیم می‌شوند. شاید علت این نام‌گذاری در تقدم و تأخر اختراع این دو نوع رادار باشد. کلمه رادار بیشتر به‌عنوان رادارهای اولیه شناخته‌شده است. در یک رادار پالسی اولیه، پالس‌های با فرکانس رادیویی و انرژی زیاد توسط آنتن در حال چرخش ارسال می‌گردد. اگر این پالس‌ها به اشیاء اطراف رادار مثل بدنه هواپیما برخورد نمایند، مقدار کمی از انرژی منعکس‌شده به سمت آنتن در حال گردش برمی‌گردد، بسته به قدرت آشکارسازی رادار، این امواج انعکاسی ضعیف طی فرآیندی آشکارسازی می‌شود. وقتی هدفی با این روش آشکارسازی شد:

۱- فاصله آن با اندازه‌گیری زمان سپری‌شده مابین ارسال پالس و دریافت موج منعکس‌شده محاسبه می‌شود.

۲- جهت هدف بر مبنای جهت آنتن درزمانی که هدف آشکارشده است نشان داده می‌شود.

نقطه قوت این رادارها آن است که در محدوده کاری خود، احتیاج به هیچ دستگاه بخصوصی در هواپیما نیست زیرا بر اساس موج انعکاسی از هدف کار می‌کند(Honold،۱۹۷۱:۴۶).برخی از نقاط ضعف رادارهای اولیه عبارت‌اند از:

۱- برای تشخیص اینکه انعکاس دریافتی مربوط به یک هدف حقیقی است یا ناشی از عوامل مزاحم است نیاز به ارسال توان بالایی توسط رادار است و حتی بااین‌وجود ممکن است در برخی موارد به دلیل انعکاس‌های ناخواسته تشخیص هدف مشکل باشد.

۲- امکان تفکیک هواپیماهای مشابه در محدوده تحت نظارت رادار بعضاً مشکل و غیرممکن است.

۳- امکان تعیین دقیق و صحیح ارتفاع هواپیما وجود ندارد.

٤- در کاربردهای امنیتی مثلاً در رادارهای دیده‌بانی نظامی، امکان تفکیک اهداف و هواپیماهای خودی از هواپیماهای دشمن وجود ندارد.

برای رفع موارد بالا، رادارهای نظارتی ثانویه به وجود آمدند. ازآنجاکه در شکل اولیه این رادارها کاربردهای نظامی مطرح بودند لذا در کاربردهای نظامی به نام سامانه‌های تشخیص دوست یا

۱- Primary

۲- Secondary Surveillance Radar

دشمن یا IFF[۱] نام‌گذاری شده‌اند (Yu،۲۰۱۵:۴۶).یک سیستم SSR از بخش‌های زیر تشکیل می‌شود:

- یک فرستنده و گیرنده مخصوص که در هواپیما نصب می‌شود و به نام ترانسپوندر[۲] نامیده می‌شود.
- یک ایستگاه زمینی شامل آنتن گردشی و یک فرستنده/گیرنده که به آن (استعلام کننده)[۳] گفته می‌شود.

تجهیزاتی که در هواپیما نصب می‌شوند شامل:

- یک آنتن که معمولاً در زیربدنه هواپیما نصب می‌شود و دارای پرتو (بیم) تشعشعی همه جهته است.
- یک فرستنده گیرنده
- قسمت کنترل که خلبان با تنظیم[۴] کردن کد شناسایی رادار ثانویه که توسط ایستگاهی زمینی به آن اختصاص‌یافته و نیز کد نشان‌دهنده ارتفاع، پاسخ مناسب را پخش کند.

ایستگاه زمینی نیز شامل آنتن، یک فرستنده، یک گیرنده و یک رمزگشا[۵] است. واحد رمزگشا، اطلاعات پاسخ برگشتی را به اطلاعات گزارشی از هدف تبدیل و روی نمایشگر مقابل اپراتور رادار ثانویه نشان می‌دهد. بر روی صفحه‌نمایش، موقعیت هر هواپیما به همراه کد شناسایی رادار ثانویه آن، یا شماره پرواز و همچنین ارتفاع آن نشان داده می‌شود. همان‌گونه که ذکرشده در سیستم رادار ثانویه، فرستنده رادار ثانویه (سؤال‌کننده) پالس‌های سؤال را بر روی فرکانس MHz۱۰۳۰ پخش می‌کند و هواپیما پس از دریافت پالس‌های سؤال، پاسخ برگشتی را با فرکانس MHz۱۰۹۰ به همراه اطلاعات موردنظر به ایستگاه زمینی ارسال می‌کند. در سیستم رادار ثانویه تنها یک کانال می‌تواند سیگنال‌های سؤال را انتقال و سیگنال‌های پاسخ را دریافت کند. در این بخش ساختار کلی سیگنال‌های سؤال و پاسخ را موردتوجه قرار می‌دهیم. سیگنال‌های اصلی یک سامانه SSR عبارت‌اند از سیگنال، سیگنال سؤال و سیگنال پاسخ.

- Identification Friend or Foe[۱]

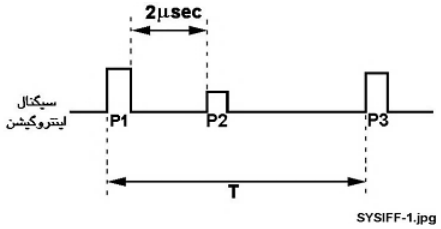
[۲]- Transponder

[۳]- Interrogator

-Set[۴]

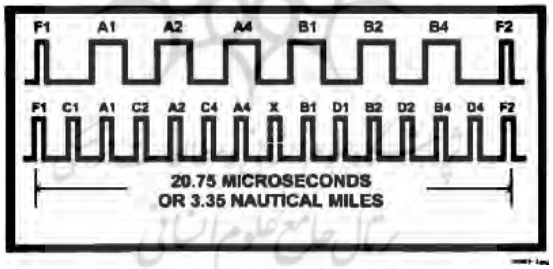
-Decoder[۵]

سیگنال ارسالی از طرف ایستگاه زمینی را سیگنال سؤال پرسشگر می‌نامند این سیگنال، متشکل از ۳ پالس است. شکل ۱ این پالس‌ها را نشان می‌دهد.
فاصله زمانی بین P1 و P3 (زمان T)، حالت یا مد[۱] سؤال مورداستفاده را تعیین می‌کند. پالس P2 در همه مدها دارای فاصله ثابت از P1 (2μsec) بوده و برای حذف ساید لوب بکار می‌رود. (Honold،۱۹۷۱:۱۳۹)



شکل (۱) فرمت پالس‌های ارسالی پرسشگر

پاسخ ترانسپوندر به یک سؤال متشکل از دو پالس براکت[۲] F2 و F1 (به‌عنوان پالس‌های قاب دهی[۳]) و حداکثر ۱۲ پالس کد است که مابین دو براکت قرارگرفته‌اند. این پاسخ متشکل از ۴ عدد ۳ بیتی در مبنای ۸[۴] است. هر پالس دارای یک نام و موقعیت مشخص است.



شکل (۲) پاسخ ترانسپوندر هواپیما در فرمت قدیم و جدید

۱- Mode
۲- Bracket
۳-Framing
۴-Octal

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مدهای مختلف رادار ثانویه، توسط فاصله بین P1 و P3 تعیین می‌شود. ترانسپوندر هواپیما با اندازه‌گیری این فاصله زمانی از مد موردتقاضا آگاه شده و پاسخ مناسب را به ایستگاه زمینی می‌فرستد. فاصله زمانی P1 و P3 در مدهای مختلف و کاربرد این مدها بدین ترتیب است:

- **مد ۱: T=3μsec (Military)**

دارای ۶۴ کد پاسخ است که در کنترل ترافیک هوایی نظامی و برای تعیین اینکه چه نوعی از هواپیما پاسخ می‌دهد و یا اینکه در چه مأموریتی است بکار می‌رود. در این مد، سامانه رادار ثانویه زمینی فقط پالس‌های A و B را آشکار می‌کند.

- **مد ۲: T=5μsec (Military Identity)**

این مد نیز دارای کاربرد نظامی است که درخواست عدد شناسایی[۱] را از هواپیما می‌کند. ۴۰۹۶ کد پاسخ ممکن در این مد وجود دارد.

- **مد T=8μsec (Civil/Military Identity):3/A**

مد کنترل ترافیک هوایی استاندارد است. این مد، همراه مد گزارش ارتفاع (مد C) برای کنترل هواپیماهایی که تحت قوانین پرواز، پرواز می‌کنند، استفاده می‌شود.

- **مد T=21μsec:C**

در این مد سامانه رادار پرسشگر درخواست ارسال ارتفاع هواپیما را از ترانسپوندر می‌کند. ارتفاع هواپیما در گام‌های ۱۰۰ پایی و در محدوده ۱۰۰۰ فوت تا ۱۲۶۷۰۰ فوت به‌طور خودکار و با استفاده از اطلاعات ارتفاع‌سنج[۲] هواپیما ارسال می‌شود. تنها ۱۱ پالس برای پاسخ به سؤال مد C در نظر گرفته‌شده است (پالس D1 استفاده‌نشده) لذا ۲۰۴۸ حالت مختلف داریم. ارتفاعی که هواپیما گزارش می‌کند بر اساس اختلاف فشار سطح دریا و فشار هوائی است که هواپیما در آن ارتفاع قرار دارد چون ارتفاع‌سنج هواپیماها معمولاً با استفاده از فشار هوا، ارتفاع را می‌سنجد، باید در مناطق جغرافیایی مختلف بین دو فرودگاه، در برخاست هواپیما، کمی بعد از برخاستن و قبل از فرود آمدن تنظیم شود. تجهیزات زمینی بر اساس فشار محلی، تصحیح بارومتریک را به‌صورت خودکار اضافه می‌کنند. همچنین از کدینگ Gillham جهت تصحیح خطا در این مد استفاده می‌شود. (stevens،۱۹۸۸:۶۸)

۱- Identity

۲- Altimeter

- **مد ۴: (Secure Military Mode)**

این مد از سال ۱۹۸۰ برای کشورهای عضو ناتو طراحی و تا امروز بکار گرفته‌شده است. به علت آنکه امنیت در مدهای ۱ و ۲ (مدهای نظامی) بسیار پایین بود و امکان فریب، اختلال و شنود این مدها بسیار بالابود لذا این مد پا به عرصه هوانوردی نظامی نهاد. سیگنال پرسشگر این مد، با بقیه مدها متفاوت است. این سیگنال، شامل بیت‌های یک کلمه خیلی طویل است که به ترانسپوندر می‌گوید در مورد یک پیام محرمانه است. خود این سیگنال در سامانه پرسشگر توسط یک قسمت جداگانه و با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی مختلف رمز می‌شود. ترانسپوندر پس از دریافت این کلمه، آن را به یک قسمت مجزا می‌فرستد که از الگوریتم معکوس برای دیکد کردن آن استفاده می‌کند. هر کلمه به ترانسپوندر می‌گوید که به روش خاصی پاسخ دهد. درصورتی‌که ترانسپوندر نتواند کلمه را رمزگشایی کند، قادر نیست که به روش صحیحی پاسخ داده و بنابراین به‌عنوان یک دوست نیز شناخته نمی‌شود. برای جلوگیری از استفاده دشمن در مواقعی که تجهیزات به دست وی می‌افتد، باید کد کلید متناوباً وارد سیستم شود.

مد S:

در سال ۲۰۰۶ بکار گیری مد S به دلایل:

۱. مدهای عادی در محیط‌های پرترافیک کارایی خوبی ندارند.
۲. در مدهای معمولی تمامی هواپیماهایی که در یک زاویه قرار دارند هم‌زمان به سیگنال پرسش پاسخ می‌دهند.
۳. تداخل بسیار زیاد وجود دارد. (فضای آدرس‌دهی در مدهای معمولی فقط ۴۰۹۶ عدد بوده و در زمان پرترافیک کارایی لازم را ندارد.)
۴. احتمال خطای انسانی در برج مراقبت برای اشتباه گرفتن دو هواپیما که کد یکسان دارند وجود دارد.
۵. احتمال اشتباه گرفتن هواپیماها با یکدیگر و عدم کنترل
۶. برخورد هواپیماها

برای کلیه کشورهای اروپایی و از سال ۲۰۱۲ بکار گیری آن برای کلیه کشورها توسط ICAO[۱] اجباری شد؛ اما بعد از سال ۲۰۱۲ با توجه به اینکه نوسازی سامانه‌های رادار ثانویه برای کشورهای در حال پیشرفت هزینه‌بر بودن این امر تاکنون به تعویق افتاده است. (Petrochilos،۲۰۱۴:۸۷)

[۱]- International Civil Aviation Organization

شکل (۳) نمایی از انتخاب‌گر مد در هواپیما (https://www.radar tutorial.eu)

در جدول ۱ می‌توان مد S را با سایر مدهای سامانه رادار ثانویه مقایسه نمود.

جدول (۱) مقایسه مد S با سایر حالت‌های رادار ثانویه

Mode S	Monopulse	Standard SSR	
1	8–4	30–20	پاسخ در هر اسکن
Rms 7 m	Rms 13 m	Rms 230 m	دقت در رنج
Rms 0.04°	Rms 0.04°	Rms 0.08°	دقت در سمت
f t (7.6 m) 25	ft 100	ft (30 m) 100	قدرت تفکیک ارتفاع
best	good	poor	مقاومت در برابر اخلال
bits 1,280–56	0	0	ظرفیت دیتا ((uplink
bits 1,280–56	bits 23	bits 23	ظرفیت دیتا(downlink)
million 16	4,096	4,096	تعداد کدها

شکل سیگنال پرسشگر می‌تواند به یکی از سه روش مطابق جدول ۱ باشد.

جدول (۲) سیگنال‌های پرسش در مد S

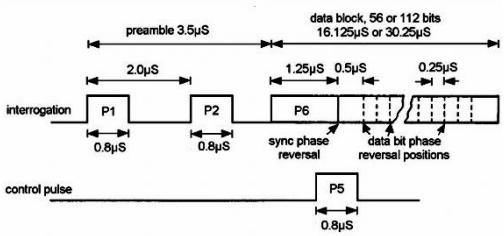
نام	شکل	کاربرد
Surveillance	short	position update
Comm-B	long	contains 56 data bits
Comm-D	long	up to 16 long interrogations strung together to transmit up to 1280 bits

همچنین سیگنال پاسخ در مدهای کوتاه[۱] و بلند[۲] ارسال می‌گردد و پهنای پالس ارسالی در حالت کوتاه پالس برابر با ۵۶ میکروثانیه و در حالت Long برابر با ۱۱۲ میکروثانیه است.

۱- Short

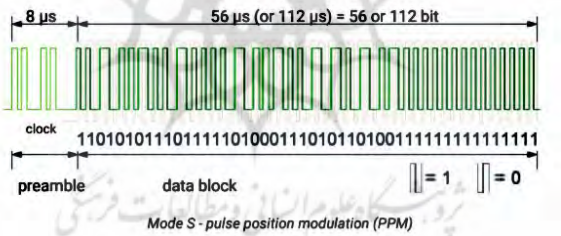
۲- Long

در مد S پنج بیت اول سیگنال پاسخ تحت عنوان[1](DF) شناخته می‌شوند که در جدول ۱ آورده شده که هر کد بیانگر یک موضوع ناوبری است.



شکل (۴) سیگنال پرسشگر مدS

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد پالس P2 بافاصله ۲ میکروثانیه از پالس P1 قرارگرفته و علت آن این است که در سامانه‌هایی که فاقد مد S می‌باشند این پالس را به‌عنوان پالس آنتن SLC[2] دریافت می‌کنند و لذا به این سیگنال پاسخ نمی‌دهند. همچنین پالس P6 به‌منظور سنکرون سازی و غلبه بر مسائل RF در تقویت‌کننده‌های قدرت بخصوص غلبه بر زمان خیزش[3] و زمان نزول پالس[4] در این مد طراحی‌شده‌اند. لازم به ذکر است که مدولاسیون بکار رفته در مد S از نوع DPSK[5] است. (Hong،۱۱۳،۲۰۰۸)



شکل (۵) سیگنال پاسخ مد S

-Downlink Field[1]
-Side Lobe Cancelation[2]
-Raise Time[3]
-Fall Time[4]
-Differential Phase Shift Keying[5]

در فرمت پاسخ ۵۶ میکروثانیه، ۵ بیت اول به‌عنوان شماره قالب دهی[۱] و ۲۷ بیت بعدی تحت عنوان کنترل و فرمان رهیابی[۲] و ۲۴ بیت مابقی به‌عنوان آدرس[۳] شناخته می‌شوند. فرمت پاسخ ۱۱۲ به دو روش انجام می‌گیرد در حالت اول ۵ بیت اول به‌عنوان شماره قالب دهی و ۲۷ بیت بعدی تحت عنوان کنترل و فرمان رهیابی و ۵۶ بیت بعدی به‌عنوان میدان پیام[۴] و ۲۴ بیت نهایی تحت عنوان آدرس بکار گرفته می‌شوند. در حالت دوم ۲ بیت اول به‌عنوان شماره قالب دهی و ۶ بیت بعدی تحت عنوان فرمان کنترل[۵] و ۸۰ بیت بعدی به‌عنوان میدان پیام و ۲۴ بیت نهایی تحت عنوان آدرس مورداستفاده قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که ۲۴ بیت آدرس مختص هواپیما بوده و به‌عنوان پلاک هواپیما از آن نیز یاد می‌کنند؛ و تا زمانی که هواپیما در مالکیت یک کشور است این کد تغییر نمی‌کند. (stevens،۱۹۸۸:۲۵۱)

- **مد 5:(New Sequrity Mode)**

این مد در سال ۲۰۰۵ به‌صورت آزمایشی در هواپیماهای نظامی بکار گرفته‌شده و از فن طیف گسترده بهره می‌برد. در حال حاضر اطلاعات خاصی از این مد در دسترس نیست و حتی شنود این مد کار بسیار دشوار و پیچیده‌ای است.

روش‌شناسی پژوهش

در مخابرات طیف گسترده، پهنای باند سیگنال قبل از ارسال گسترش داده می‌شود به‌طوری‌که معمولاً تمام پهنای باند در دسترس کانال را اشغال می‌نماید. وقتی فقط یک کاربر از کانال استفاده نماید، این روش ازنظر استفاده از پهنای باند کارا نیست؛ اما وقتی چندین کاربر وجود دارند، همگی می‌توانند از باند فرکانسی مشابهی استفاده نمایند. در این صورت، سیستم ازنظر پهنای باند نیز کارایی داشته و هم‌زمان از مزایای طیف گسترده نیز استفاده می‌شود.

شکل ۶ نمودار کلی یک سیستم مخابرات طیف گسترده را نشان می‌دهد که می‌تواند برای ارسال زمینی یا ماهواره‌ای مورداستفاده قرار گیرد. اگر منبع اطلاعاتی آنالوگ باشد ابتدا در بلوک A/D به دیجیتال تبدیل می‌شود. در این مرحله می‌توان همانند سایر سامانه‌های مخابراتی از تکنیک‌های فشرده‌سازی اطلاعات برای حذف اطلاعات اضافی و روش‌های کدگذاری برای آشکار-

---

۱- Format Number

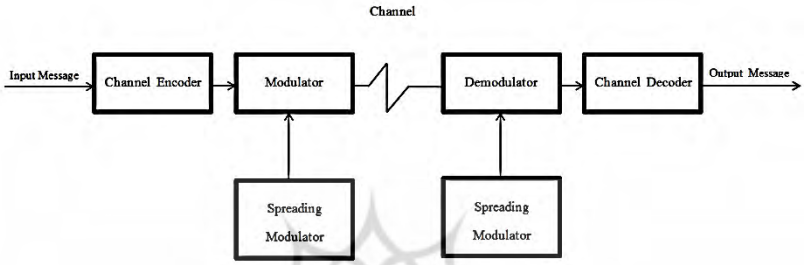
۲- Surv.comm & Control

۳- Address

۴- Message Field

۵- Command Control

سازی و تصحیح خطا استفاده نمود. سپس طیف سیگنال حاصل توسط یک دنباله شبه تصادفی گسترده شده و قبل از ارسال در کانال ارتباطی تقویت می‌شود. در کانال ارتباطی و صرف‌نظر از زمینی یا ماهواره‌ای بودن آن، نویز، تداخل و تضعیف وجود خواهد داشت. مدولاتور می‌تواند قبل از واحد گسترده کننده طیف یا پس‌ازآن باشد و معمولاً این دو بخش به‌صورت واحد و در یک قسمت قرار می‌گیرند. در طرف گیرنده، برای بازسازی سیگنال اولیه پردازش‌های معکوس صورت می‌گیرد یعنی سیگنال، آشکارشده و طیف آن جمع می‌گردد و درصورتی‌که سیگنال آنالوگ باشد به واحد D/A منتقل می‌گردد.



شکل (۶) نمای بلوکی سیستم مخابرات طیف گسترده

استفاده از سامانه‌های طیف گسترده باعث بهبود کیفیت انتقال اطلاعات در سامانه‌های مخابراتی می‌شود. به‌طورکلی، مقدار بهبود کیفیتی که براثر استفاده از یک سیستم طیف گسترده به دست می‌آید بهره پردازش نامیده می‌شود. بهره پردازش را می‌توان به‌عنوان تفاوت میان عملکرد سامانه‌ای که از طیف گسترده استفاده می‌کند و عملکرد سامانه‌ای که از این تکنیک استفاده نمی‌کند، هنگامی‌که بقیه شرایط برای دو سیستم یکسان باشد تعریف نمود؛ بنابراین بهره پردازش پارامتری است که با آن می‌توان کیفیت سیستم طیف گسترده را نشان داد. سه رابطه رایج برای بهره پردازش در نظر گرفته‌شده است: (Dixon،۱۹۸۴: ۱۰)

۱- نسبت SNR خروجی به SNR ورودی بعد از فیلتر کردن نهایی

$$PG = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} \qquad (۱)$$

۲- نسبت پهنای باند سیگنال گسترده شده به نرخ ارسال اطلاعات

$$PG = \frac{BW_{in}}{R_b} \qquad (۲)$$

۳- نسبت پهنای باند سیگنال گسترده شده به پهنای باند پیام مدوله‌شده

$$PG = \frac{PW_{Out}}{PW_{in}} \equiv \frac{BW_{in}}{BW_{out}} \quad (۳)$$

به‌طور خلاصه می‌توان هر سیستم طیف گسترده را دریکی از دسته‌بندی‌های زیر جای داد. (Dixon،۱۹۸۴:۱۵،۲۸،۴۲)

- سیستم طیف گسترده دنباله مستقیم[۱] یا شبه نویز[۲](DS) / (PN)
- سیستم طیف گسترده جهش فرکانسی[۳](FH)
- سیستم طیف گسترده جهش زمانی[۴](TH)
- سیستم طیف گسترده جاروب فرکانسی (CHIRP)
- سیستم طیف گسترده با ترکیب روش‌های فوق (HYBRID)

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

به‌منظور طراحی رادار ثانویه به روش طیف گسترده یکی از مهم‌ترین بخش‌ها طراحی دنباله تصادفی است که در این طرح از دنباله تصادفی طلایی[۵] بهره گرفته می‌شود. یک دنباله تصادفی به دنباله‌ای گفته می‌شود که عناصر آن توسط یک متغیر تصادفی با توزیعی از پیش معلوم تولیدشده و احتمال انتخاب تمامی عناصر باهم مساوی باشد. برای دنباله‌های باینری، یک دنباله که احتمال انتخاب هریک از بیت‌های آن برابر ۱/۲ است را دنباله باینری تصادفی[۶](RBS) می‌نامیم. چنین دنباله‌هایی به دلیل داشتن خواص موردنظر در سامانه‌های طیف گسترده مورداستفاده قرارگرفته و امنیت کامل برای ارتباط مخابراتی را ایجاد می‌کنند؛ اما اولاً تولید کدهای کاملاً تصادفی غیرممکن بوده و به‌علاوه در صورت تولید، آشکارسازی که بتواند چنین سیگنالی را آشکار کند وجود نخواهد داشت.

۱- Direct Sequence

۲- Pseudo Noise

۳- Frequency Hopping

۴- Time Hopping

۵-Gold Sequence

۶-Random Binary Sequence

برای رفع این مشکل در عمل از دنباله‌های باینری شبه تصادفی[۱](PRBS) پریودیک استفاده می‌شود. این دنباله‌ها تابع خودهمبستگی نویز گونه داشته و بنابراین به آن‌ها دنباله‌های شبه نویز[۲] (PN) نیز گفته می‌شود.

خواصی که یک دنباله شبه تصادفی باید داشته باشد به شرح زیراست:

- تعداد صفر و یک‌ها در این دنباله باید تقریباً برابر باشد.
- صفرها و یک‌ها در دنباله حتی‌الامکان به‌صورت پیاپی اتفاق بیفتند.
- تابع خودهمبستگی دنباله هر چه بیشتر به تابع ضربه گسسته شبیه باشد.

مداراتی که به‌عنوان مولد یک کد گسترش‌دهنده به کار می‌روند، باید علاوه بردادن خواص شبه تصادفی به دنباله خروجی، بتوانند سایر ملاحظات سیستم طیف گسترده را نیز برآورده کنند. ازجمله باید توان تولید دنباله‌های با نرخ بسیار بالا را داشته و عملکرد خوبی در فرکانس‌های بالا داشته باشند. همچنین مدار مربوطه باید بتواند به‌منظور حذف اختلال در سیستم، دنباله‌هایی با پریود بسیار زیاد تولید کند و درصورتی‌که استفاده از سامانه‌های CDMA[3]، ملاحظات مربوط به داشتن حداکثر ظرفیت در سیستم (تولید تعداد کدهای زیاد و کدهای با همبستگی متقابل[۴] حداقل) را برآورده سازد.در سامانه‌های طیف گسترده معمولاً از مدارات شیفت رجیستر خطی LFSR[۵] یا غیرخطی NLFFL[۶] به‌عنوان انتخاب مناسب جهت برآورده ساختن نیازهای فوق استفاده می‌شود. در هر پالس ساعت محتویات شیفت رجیسترها یک واحد به سمت راست شیفت پیداکرده و به‌طور هم‌زمان یک بیت به‌عنوان خروجی تولیدشده و یک ترکیب خطی از محتویات شیفت رجیستر با ضرایب gk تولید و مقادیر جدید را برای حالت اولیه رجیستر (در ساختار فیبوناچی) یا حالت اولیه کلیه رجیسترها (در ساختار گالوا) شکل می‌دهند. این دو ساختار از دیدگاه خروجی یکسان هستند. با این تفاوت که خروجی ساختار فیبوناچی نسبت به خروج ساختار گالوا دارای n واحد تأخیر زمانی است. انتخاب یکی از این دو ترکیب برای یک دوره خاص به مسائلی از قبیل سرعتی که باید سخت‌افزار در آن کار کند و اینکه آیا وجود خروجی‌های تأخیر یافته لازم هستند یا نه بستگی دارد. در سرعت‌های بالا به دلیل تأخیر بازگشتی کمتر در مسیر

۱- Pseudo Random Binary Sequence

۲-Pseudo Noise

3-Code Division Multiple Access

۴- Cross Correlation

۵- Linear Feedback Shift Register

۶- Non Linear Feed Forward Logic

فیدبک بیشتر از ساختار گالوا استفاده می‌شود. در این ساختار عمل جمع به‌طور موازی در مدارهای XOR انجام‌شده، زمان حالت گذاری مدار پس از اعمال پالس ساعت برابر مجموع تأخیر یک فیلیپ فلاپ و یک جمع کننده خواهد بود. درحالی‌که میزان تأخیر در مدار ساختار فیبوناچی برابر با مجموع تأخیر n-1 جمع کننده و یک فیلیپ فلاپ است که به‌مراتب بیشتر از ساختار گالوا است. (Ziemer،۱۹۸۵:۸۹)

برای تعیین خروجی این دو ساختار، مثلاً ساختار گالوا اگر فرض کنیم که رشته $g(D)$ مطابق با رابطه (۴) یک‌چند جمله‌ای باینری از درجه n و تابعی از عملگر تأخیر D باشد، این چندجمله‌ای را که تنها به ضرایب ساختار مداری شیفت رجیستر بستگی دارد، چندجمله‌ای مشخصه LFSR یا چندجمله‌ای مولد شیفت رجیستر نامیده می‌شود که در آن $g_n=1$ فرض می‌شود.

$$g(D)=g_0+g_1D+g_2D^2+\ldots+g_nD^n \qquad (۴)$$

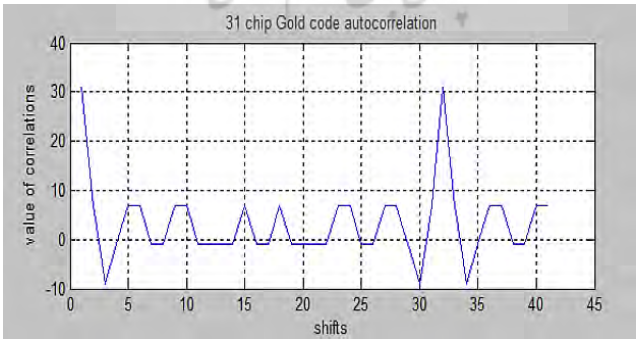
همچنین برای داشتن خواصی نظیر حداکثر بودن پریود دامنه و ... باید ضریب g_0 نیز برابر یک باشد. برای این ساختار ثابت‌شده است که در این ساختار دنباله خروجی b(D) توسط شیفت رجیستر LFSR با چندجمله‌ای مولد g (D) به‌صورت رابطه زیر تولید می‌گردد.

$$b(D)=\frac{a(D)}{g(D)} \qquad (۵)$$

که در آن:

$$a(D)=a_0+a_1D+\ldots+a_{n-1}D^{n-1} \qquad (۶)$$

$a(D)$ بارگذاری اولیه و n تعداد مراحل (حالت‌های) شیفت رجیستر می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دنباله خروجی علاوه بر تابع مولد به بارگذاری در شرایط اولیه رجیستر نیز بستگی دارد.



شکل (۷) نمایش تابع همبستگی کد گلد ۳۱ بیتی در نرم‌افزار متلب

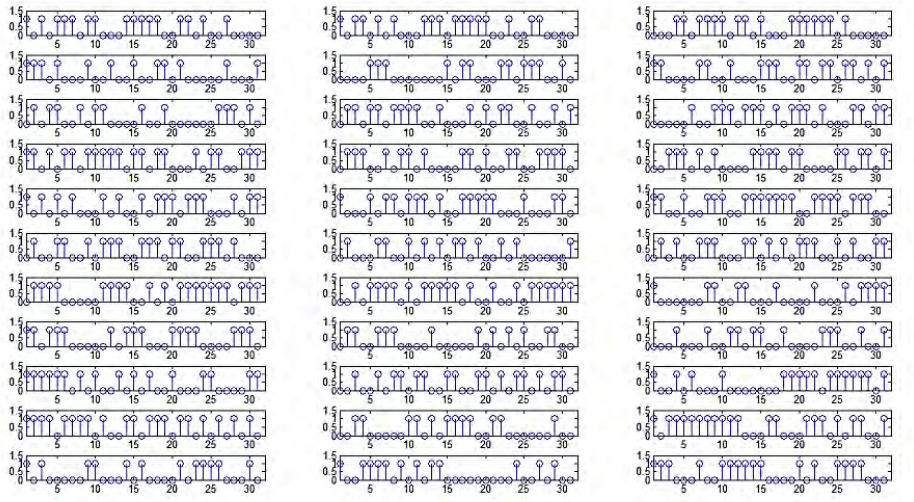
جدول (۳) مقایسه مشخصات برخی از دنباله‌های کد گلد رایج

ردیف	طول کد گلد	تعداد کدها در دنباله	نسبت توان قله به گلبرگ فرعی (dB)	نسبت در صد ۱- به ۱+
۱	۷	۹	-۷/۳۵	٪۵۳
۲	۱۵	۱۷	-۶/۶۲	٪۳۹/۴
۳	۳۱	۳۳	-۱۲/۹۲	٪۵۰/۸
۴	۶۳	۶۵	-۱۲/۴۷	٪۷۵/۲
۵	۱۲۷	۱۲۹	-۱۸/۵۵	٪۵۰/۲
۶	۲۵۵	۲۵۷	-۱۲/۱۴	٪۴۱/۲

در طراحی ساختار دیتای ارسالی باید مدنظر داشت که تعداد بیت‌های ارسالی بایستی به‌اندازه لازم و کافی باشند تا بتوان عملیاتی نظیر رمزگذاری، اضافه نمودن بیت تشخیص... خطا، اضافه نمودن بیت ای تصحیح خطا و ... را در خصوص دیتا انجام داد. همچنین بایستی این مسئله مدنظر قرار گیرد که با اضافه‌شده تعداد بیت‌ها زمان ارسال نیز بیشتر شده و همین امر موجب افزایش زمان ارسال می‌گردد لذا محدودیت‌هایی در انتخاب نوع تقویت‌کننده‌های فرستنده و همچنین زمان‌بندی لینک ارسال بین فرستنده و گیرنده می‌گردد و هرچه زمان ارسال بیشتر شود اولاً انتخاب ترانزیستورهای قدرت (از نوع پالسی) مشکل‌تر شده ثانیاً با اختصاص زمان بیشتر به ارسال باعث کاهش ارتباط در زمان ترافیک هوایی برای پرنده‌ها (انواع هواپیماها) خواهد شد و باعث ایجاد تداخل زیاد می‌گردد لذا با در نظر گرفتن سبک‌سنگینی[۱] برای این طرح میزان ۳۲ بیت در نظر گرفته می‌شود. انتخاب این مقدار بیت عددی برابر با ۴۲۹۴۹۶۷۲۹۶ حالت برای ما اتخاذ می‌گردد که عددی مناسب است؛ که نتایج حاصله در شکل ۸ قابل‌مشاهده است.

پرتال جامع علوم انسانی

۱- Trade off



شکل (۸) مجموعه دنباله از کد ۳۱ بیتی گلد با استارت شیفت رجیستر 00001

برای سنکرون سازی طیف گسترده روش‌های متعددی وجود دارد مانند سنکرون سازی به روش DLL[1] اما این روش دارای معایبی مانند پایین بودن زمان سنکرون سازی و عدم بکار گیری کدهای متعدد در طول دنباله ارسالی است. به‌جای استفاده از این روش می‌توان از روش سنکرون سازی اولیه با کمک فیلتر منطبق که یکی از روش‌های نوین و به‌روز در بحث طیف گسترده است بهره گرفت. در این روش سنکرون سازی نه‌تنها با دقت بیشتری انجام می‌پذیرد بلکه سرعت آن در حالت‌هایی که تعویض کدها انجام می‌پذیرد به‌مراتب بالاتر است. عیب این روش پیچیدگی و بالا بودن هزینه تمام‌شده و همچنین حجم بالای قطعات مصرفی است که در طراحی‌های دیجیتال و با به‌کارگیری از FPGA[2] های بروز این مشکل مرتفع گردیده است.

در ابتدا و به‌منظور احتمال کاهش شنود سامانه طراحی سامانه بر اساس ۳۲ بیت دیتا در نظر گرفته می‌شود و هر بیت از دیتا به یک کد ۳۱ بیتی از نوع گلد تبدیل می‌شود؛ این حالت طراحی اولیه مد Z1 نامیده می‌شود و با انتخاب روش سنکرون سازی موازی به‌نحوی‌که با انتخاب یک کد ۳۱ بیتی بارکر ترکیبی در ابتدای کد که نمایانگر شروع مدار سنکرون ساز است عمل سنکرون سازی برای مدار گیرنده مشخص می‌گردد که این روش دارای مزایای بیشتر و بهتری نسب به روش سنکرون سازی سری است. با انتخاب و طراحی ۳۲ فیلتر منطبق عمل سنکرون سازی انجام می‌شود.با توجه به رابطه ۳ بهره پردازش در این حالت برابر است با:

-Delay lock Loop[1]

[2]-Field Programmable Gate Array

$$PG = 10\log_{10}(PCR) = 10\,LOG\left(\frac{31}{1}\right) = 14.9dB \cong 15dB$$

که در رابطه بالا PCR برابر با نسبت حذف گسترش و یا فشرده‌سازی سیگنال است.

بزرگ‌ترین عیب طراحی به روش بالا مقاومت کم در برابر اخلال است، با توجه به رابطه حاشیه امن[1] در برابر اخلال برابر است با:

$$JM = PG - [Sys_{loss} + SNR_{out}] \qquad (۷)$$

از آنجائی که مدولاسیون ارسال و دریافت سیگنال BPSK انتخاب‌شده لذا با توجه به شکل ۹ حداقل سیگنال به نویز قابل آشکارسازی با توجه به نرخ نسبت خطای بیت ارسالی $۱۰^{-۵}$ در حالت هم‌زمانی[2] برابر با ۹/۳dB به دست می‌آید.همچنین اگر مقدار مجموع تلفات در سامانه برابر با ۳dB در نظر گرفته شود آنگاه با توجه به رابطه ۷:

$$JM = 15dB - [3 + 9.3]dB = 2.7dB \cong 3dB$$

ملاحظه می‌شود که این طراحی تنها به‌اندازه ۳dB در برابر اخلال امنیت دارد

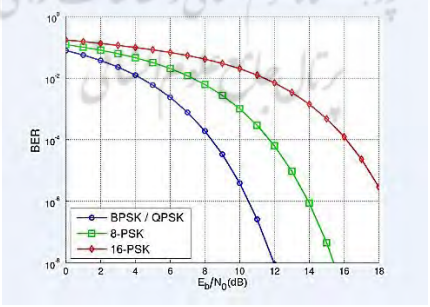
به‌منظور غلبه کردن بر مشکل بالا یک مد ۱۶ بیتی دیگر تحت عنوان مد Z2 انتخاب می‌شود به‌نحوی‌که طول هر بیت به یک دنباله ۱۲۷ بیتی از کد گلد تبدیل می‌شود. در این حالت بهره پردازشی برابر است با:

$$PG = 10\log_{10}(PCR) = 10\,LOG\left(\frac{127}{1}\right) = 21.03dB \cong 21dB$$

با توجه به رابطه ۷ حاشیه امنیت در برابر اخلال در این حالت برابر است با:

$$JM = 21dB - [3 + 9.3]dB = 8.7dB \cong 9dB$$

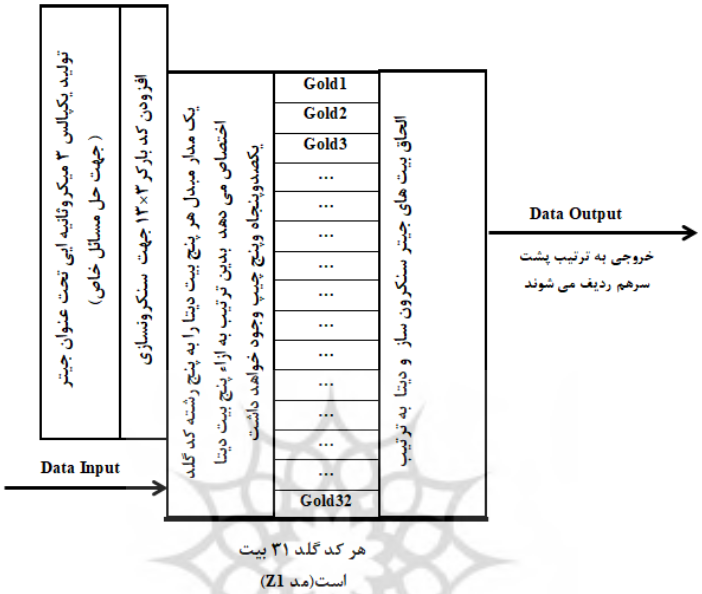
ملاحظه می‌شود در این حالت امنیت سیگنال در برابر اخلال بهبودیافته و تا حد خوبی قابل‌قبول است.



شکل (۹) نمودار حداقل سیگنال به نویز قابل آشکارسازی با توجه نرخ نسبت خطای بیت

[1] -Jamming Margine
[2]-Synchronous

لذا طراحی با دو مد کاری Z1 و Z2 به اتمام می‌رسد به‌نحوی‌که مد Z1 جهت بهره‌برداری در حالت نرمال و مد Z2 تحت عنوان مد امن و منظور بهره‌برداری سامانه به هنگام حمله الکترونیکی مورداستفاده قرار می‌گیرد.



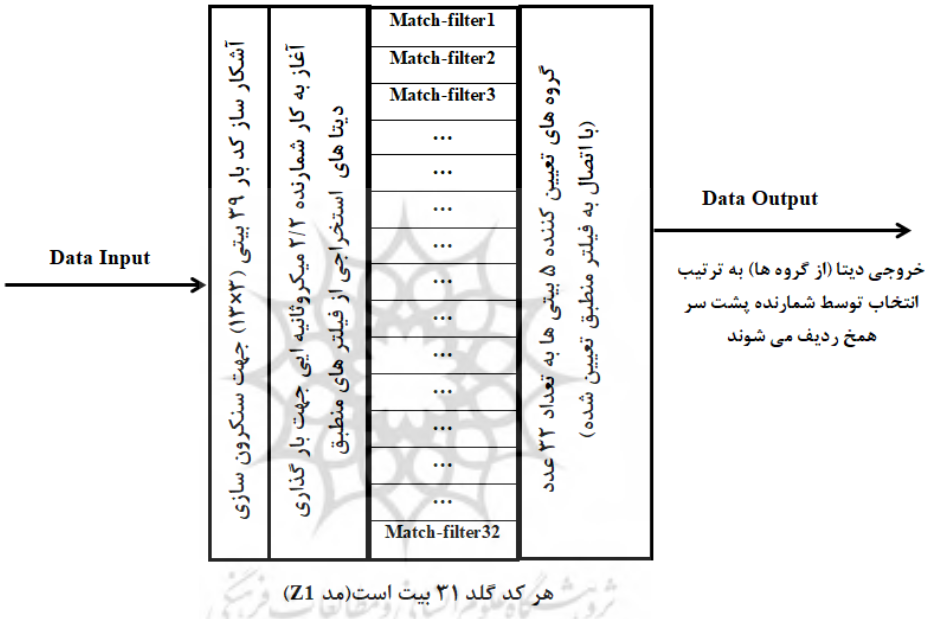
شکل (۱۰) بلوک دیاگرام تولید رشته‌های گلد و سنکرون ساز در فرستنده در مد Z1

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشخص‌شده است به‌منظور برطرف نمودن مسائل خاص RF از قبیل زمان صعود[1] و زمان نزول[2] و در ترانزیستورها و همچنین مقابله با اثر تخریب فیلتر در اولین کد در چیپ ارسالی لذا یک پالس ۳ میکروثانیه‌ای در ابتدای رشته چیپ ارسالی افزوده می‌شود و بعدازآن با اضافه نمودن یک کد بارکر ۳۹ بیتی ترکیبی (۱۳×۳) که نزدیک به میزان نرخ چیپ‌های کد گلد است به‌منظور سنکرون سازی گیرنده بهره گرفته می‌شود. سپس با کمک یک مبدل هر پنج بیت دیتا جدا شده و به ازا هر مقدار از ۰ تا ۳۱ یک سری از کدهای گرد به‌صورت متوالی باهم متصل می‌شوند. بدین ترتیب در هر گروه ارسالی در مد Z1 تعداد ۱۵۵ چیپ خواهد بود و نیز در مد Z2 تعداد ۵۰۸ چیپ وجود دارد.

همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشخص‌شده است در مد Z1 ابتدا سیگنال بایستی از مدار سنکرون ساز که یک فیلتر منطبق با طول ۳۹ بیت و از نوع بارکر است عبور کند سپس پس از آشکارسازی

[1] - Fall Time
[2] -Rise Time

کد سنکرون سازی اقدام به تولید پالس‌هایی با عرض ۱/۵۵ میکروثانیه جهت چینش گروه‌ها می‌نماید. (تمامی این امور به‌صورت موازی انجام می‌شود) سپس بر اساس چینش الگوی گروه فیلترهای منطبق اقدام به استخراج دیتا می‌نماید و درنهایت با کمک شمارنده بخش اول دیتاها در جای مناسب خود قرار می‌گیرند و درنهایت پس از استخراج دیتا در مراحل بعدی آشکارسازی سیگنال انجام می‌پذیرد. به همین ترتیب در مد Z2 نیز بعد از عبور از کد سنکرون ساز بارکر آشکارسازی پالس‌هایی با عرض ۶/۳۵ میکروثانیه انجام پذیرفته و درنهایت کدها استخراج می‌گردد.



شکل (۱۱) بلوک دیاگرام مدار آشکارساز رشته کدها و سنکرون ساز گیرنده در مد Z1 پیشنهادی

در سامانه رادار ثانویه مقدار حداقل سطح توان قابل آشکارسازی از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$S_{min} = P_R = \left[\frac{P_T . G_T . \lambda . G_R}{(4\pi)^2 . R^2 . KTB . F . L}\right] \quad (۸)$$

که در رابطه بالا P_T توان فرستنده ارسالی، G_T بهره آنتن فرستنده، λ طول‌موج سیگنال، G_R بهره آنتن گیرنده، R فاصله بین فرستنده و گیرنده، K ثابت بولتزمن، T دما برحسب کلوین، F عدد نویز

گیرنده،L مجموع تلفات موجود در سیستم است؛ که حداقل سیگنال به نویز قابل آشکارسازی در رابطه ۸ برای یک سامانه طیف گسترده از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$S_{\min} = P_R = \left[\frac{P_T.G_T.\lambda.G_R}{(4\pi)^2.R^2.KTB.F.L}\right] + PG - Sys_{Loss} \qquad (۹)$$

که در رابطه ۹،Sys_{Loss} برابر با تلفات کلی گیرنده سامانه و PG بهره پردازشی در حالت استفاده از طیف گسترده است.

با توجه به اینکه توان متوسط در حالت طیف گسترده تغییر کرده لذا می‌توان نوشت:

$$S_{\min} = P_R = \left[\frac{P_T.(\frac{\tau}{T}).G_T.\lambda.G_R}{(4\pi)^2.R^2.KTB.F.L}\right] + PG - Sys_{Loss} \qquad (۱۰)$$

که در رابطه ۱۰،τ برابر با پهنای پالس ارسالی (و یا دریافتی) و T نیز برابر بافاصله زمانی بین دو مجموعه پالس[۱] است. در بخش اول رابطه ۱۰ ازآنجایی‌که پهنای باند سیگنال دریافتی (و یا ارسالی) با پهنای پالس آن رابطه عکس دارد لذا تغیری در میزان سطح سیگنال به نویز حاصل نمی‌شود اما بخش دوم که بیان‌کننده بهره پردازشی است نشان‌دهنده افزایش سطح سیگنال به نویز در این حالت است. با توجه به اینکه بهره پردازشی در مد Z1 برای این طرح در حدود ۱۵ دسی‌بل و همچنین مقدار$\frac{\tau}{T}$ در این مد نیز تغییر چندانی باحالت قبل از بهره‌برداری از طیف گسترده ندارد و اگر تلفات کلی سامانه برابر با ۳ dB در نظر رفته شود، درمجموع به مقدار۱۲ dB اندازه سطح سیگنال به نویز قابل آشکارسازی افزایش می‌یابد. (سلیمانی،۱۳۸۱:۳۴)

همچنین با توجه به رابطه اختلال به سیگنال[۲] (رابطه ۱۱):

$$\frac{J}{S} = EIRP_J - EIRP_s + 20\log_{10} d_s - 20\log_{10} d_j \qquad (۱۱)$$

که در رابطه ۱۱ ، EIRP برابر با توان مؤثر برحسب وات و d برابر با فاصله برحسب کیلومتر است.همچنین اندیس‌های S وJ مخفف Signal و Jammer است.

برای فواصل ۱۰۰،۲۰۰۰و ۴۰۰ کیلومتری در مد Z1 (با فرض بهره ۱۵ dBi برای آنتن اخلال‌گر و توان ۱۰ کیلوواتی فرستنده) داریم:

$$\frac{J}{S_{100}} = 14.3\ dB \quad \frac{J}{S_{200}} = 8.3\ dB \text{ و} \quad \frac{J}{S_{400}} = 2.3\ dB \text{ و}$$

---

۱ -Pulse Repetition Time

۲ -Jammer To Signal

با توجه به روابط فوق و از آنجائی که حداقل نسبت اختلال به سیگنال بایستی 10 dB باشد لذا به‌منظور آنکه اخلال علیه سامانه مؤثر واقع شود بایستی فاصله اخلال‌گر در از سامانه کمتر از ۲۳۱ کیلومتر باشد تا اختلال مؤثر واقع گردد.

و برای فواصل ۱۰۰،۲۰۰۰و ۴۰۰ کیلومتری در مد Z2 داریم:

$$\frac{J}{S_{400}} = -3.4\ \text{dB}\ \text{و}\ \frac{J}{S_{200}} = 2.6\ \text{dB}\ \text{و}\quad \frac{J}{S_{100}} = 8.6\ \text{dB}$$

با توجه به روابط فوق و از آنجائی که حداقل نسبت اختلال به سیگنال بایستی 10 dB باشد لذا به‌منظور آنکه اخلال علیه سامانه مؤثر واقع شود بایستی فاصله اخلال‌گر در از سامانه کمتر از ۸۵ کیلومتر باشد تا اختلال مؤثر واقع گردد. این در حالی است که در حالت معمولی اخلالگر در فاصله حتی بیشتر از ۴۰۰ کیلومتری مؤثر واقع می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

توجه به جنگ‌هایی که اخیراً در سراسر دنیا روی‌داده است، به‌خوبی نشان می‌دهد که پیروزی در یک جنگ، ارتباط بسیار گسترده‌ای به استفاده مناسب از فن‌آوری‌های مخابراتی در حوزه جنگ الکترونیک و مدیریت صحیح عملیاتی در میدان نبرد دارد.یکی از بهترین روش‌های دفاع الکترونیکی در این زمینه بهره‌گیری از فن‌آوری طیف گسترده در سامانه‌های مخابراتی است.همان‌گونه که در بخش ۲-۴ بیان شد سامانه‌های رادار ثانویه به دلیل استفاده از سیگنال‌های مخابراتی ساده از امنیت سیگنالی مناسبی برخوردار نیستند و کشورهای پیشرفته در حوزه‌های نظامی همواره در حال افزایش ضریب امنیت سیگنالی سامانه‌های مخابراتی نظامی ازجمله رادار ثانویه(مانند مد ۴) بوده‌اند. در این تحقیق طراحی یک سامانه رادار ثانویه، با بکار گیری مخابرات طیف گسترده دنباله مستقیم ارائه گردید. طراحی کد طیف گسترده در این سامانه بر اساس دنباله گلد با دو طول رشته ۳۱و۱۲۷ بیتی انجام پذیرفت.در ابتدا به‌منظور انجام امور عملیاتی در حالت‌های عادی مد Z1 پیشنهاد می‌گردد ، در مد Z1 با ارسال یک کلمه ۳۲ بیتی (متشکل از دنباله کد گلد ۳۱ بیتی) ملاحظه شد که احتمال شنود حداقل به میزان بهره پردازشی ۱۴/۹ dB در این حالت کاهش یافت. همچنین مد Z2 به‌منظور انجام مأموریت‌های نظامی درصحنه‌های نبرد و جهت افزایش مقاومت در برابر اختلال ارائه گردید. در مد Z2 با ارسال یک کلمه ۱۶ بیتی (متشکل از دنباله کد گلد ۱۲۷ بیتی) با حصول ۲۰/۰۳ dB بهره پردازشی به میزان ۸/۸ dB

(تقریباً۹dB) حاشیه امنیت مناسبی(Jamming Margin) در برابر اختلال نویزی حاصل شد.در بخش ۴-۵ مشاهده شد که با بهره‌گیری از مد Z2 برد عملیاتی اخلالگر از فاصله ۴۰۰ کیلومتری به فاصله ۸۵ کیلومتری کاهش می‌یابد.

منابع

- سلیمانی محمد،۱۳۸۱، *تحلیل و طراحی رادار*، شرکت صنایع الکترونیک ایران، تهران.

- Michael C stevens,1988"*Secondary Surveillance Radar*", Boston and London: Artech House.
- Peter Honold,1971 "*Secondary Radar* ",Berlin, munchen, London and New York:Heyden&Son Ltd.
- R.E.Ziemer and R.L.Peterson, 1985"*Digital Communications spread Spectrum Systems*", New York: Macmillan.
- R.C. Dixon,1984 "*Spread Spectrum Systems*", John Wiley and Sons, New York, 2nd Ed.
- Zhang Wei,2009" *Principles of Secondary Radar*". Beijing: National Defense Industry Press.
- Wang Hong, Liu Changzhong, Wang Xuegang,2008" *Mode S for secondary surveillance radar (SSR)*" an introduction and overview. Telecommunication Engineering.
- Petrochilos N, Comon P,2006"*Link between the joint diagonalisation of symmetricalcubes and parafac: An application to secondary surveillance radar In Proceedings of IEEE*" SAM Waltham.
- Tang Bo, Chong Shuiying, Zhang Hao 2014,"*Separation of garbled secondary surveillance radar signal based on multichannel array processing*" Telecommunication Engineering.
- Petrochilos N, Piracci E G, Galati G, 2014" Improved MDA, a case for degarbling SSR mode S replies" I*EEE Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV)*, Roma.
- Chaumette E, Comon P, Muller D, 1993" *ICA-based technique for radiating sources estimation: application to airport surveillance* " IEE Proc.
- Zhang Yu, Fan Binbin, Hu Jin, et al, 2015" Separation of secondary surveillance radar signal based on MINRES optimization algorithm" *Modern Radar*.
- Liu Lei, Zhang Yu, Hu Jin, et al,2016" Separation of Garbled Secondary Surveillance Radar Replies Based On Modified Projection Algorithm" *Modern Radar*.