

پیاده‌سازی گیرنده سیگنال‌های فضایی طیف گسترده دنباله مستقیم با استفاده از GNU Radio

رسول مرادی^{۱*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، میدان غدیر- دانشگاه علم و صنعت، rasoul.m00@gmail.com

چکیده

سیگنال‌های طیف گسترده دنباله مستقیم^۱ (DSSS) به دلیل ویژگی‌های منحصربفرد در کاربردهای فضایی و بخصوص ماهواره استفاده زیادی دارند. در این سیگنال‌ها از دنباله نویز شبه مجازی^۲ (PN) برای گسترده کردن طیف و افزایش پهنای باند بکار می‌رود. در سمت گیرنده با استفاده از دنباله PN، محتوا قابل بازیابی است. رسیدن به محتوا در گیرنده سیگنال‌های DSSS نیازمند طراحی گیرنده‌های متفاوت با سیگنال‌های عادی است و به عبارت دیگر عملیات ره‌یابی^۳ و ردگیری^۴ برای این سیگنال‌ها استفاده می‌شود. استفاده از سخت‌افزار برای پیاده‌سازی این گیرنده‌ها مرسوم است که به صورت آنی^۵ قابل انجام است. با وجود سرعت پردازش بالا، پیاده‌سازی سخت‌افزاری به دلیل نیاز به سخت‌افزار دارای هزینه‌های فراوان است. از این رو و برای کاهش هزینه‌ها از ابزاری به نام رادیو نرم‌افزار^۶ (SDR) استفاده می‌شود که در آن پردازش‌ها در نرم‌افزار انجام می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده GNU Radio است که به صورت نرم‌افزاری بوده و نحوه کار آن بدین صورت است که سیگنال دریافتی از آنتن، پس از عبور از یک میدل آنالوگ به دیجیتال^۷ (ADC) در GNU Radio قابل پردازش است. در این مقاله به پیاده‌سازی گیرنده DSSS با SDR پرداخته شده است که به صورت آنی و تنها با استفاده از یک USRP قابل اجرا است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل با استفاده از BER بیت خروجی، عملکرد مطلوب این گیرنده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: DSSS - دنباله PN - رادیو نرم‌افزار - GNU Radio - USRP

۱- مقدمه

در سیستم‌های مخابراتی طیف گسترده دنباله مستقیم فضایی، داده اطلاعاتی با استفاده از دنباله PN بر روی یک پهنای باند وسیع گسترده می‌شود و گیرنده‌های متداول قادر به رسیدن به محتوای آن نیستند [۱]. از مزایای استفاده از DSSS احتمال تشخیص پایین^۸ (LPD)، احتمال شنود پایین^۹ (LPI)، مقابله با تداخل، مقابله با اختلال، مقاومت بر اثر تداخل چندمسیری، قابلیت دسترسی چندگانه و مخابره امن است و به خاطر همین مزایا سیگنال‌های DSSS به صورت گسترده در مخابرات سیار و ماهواره و بخصوص در کاربردهای دورسنجی^{۱۰} و هدایت از دور^{۱۱} استفاده می‌شوند [۲]-[۵]. همانطور که بیان شد فرستنده‌های DSSS قبل از ارسال سیگنال از یک دنباله گسترش برای مدوله کردن سیگنال استفاده می‌کنند که در

نتیجه‌ی آن چگالی طیف توان سیگنال پایین آمده و سیگنال شبیه نویز می‌شود. گیرنده برای واگسترش و رسیدن به سمبل‌های ارسالی، بین دنباله PN و سیگنال دریافتی همبستگی انجام می‌دهد. اگر دنباله PN در دسترس نباشد، سمبل‌های ارسالی قابل بازیابی نیستند و باید دنباله PN تخمین زده شود که این کار با استفاده از روش‌های مختلف نظیر تجزیه ماتریس‌ها و شبکه‌های عصبی قابل انجام است [۶]-[۱۲].

در بخش گیرنده روش‌های مختلفی ارائه شده است که یکی از آن‌ها روش شانه ای^{۱۲} است که از چندین همبسته‌ساز تشکیل شده است و برای محیط‌های چند مسیری نیز مناسب است. ولی مشکل این روش آن است که به دلیل استفاده از همبسته‌سازها پیچیدگی بالایی دارد [۱۳]. در روش‌هایی که امروزه به صورت متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد، ابتدا فرایند ره‌یابی انجام می‌شود که شامل روش‌های مختلف از جمله جست و جوی سری و موازی است. در این مرحله با داشتن دنباله PN که در فرستنده از آن استفاده شده است، آفست فرکانس داپلر و جابجایی دنباله PN بصورت تقریبی تخمین زده می‌شوند. پس از مرحله ره‌یابی با استفاده از مرحله ردگیری مقادیر دقیق آفست فرکانس داپلر و جابجایی دنباله PN بدست می‌آید که به آن سنکرون‌سازی دقیق گویند. در این مرحله حلقه فرکانس را ردگیری و تغییرات آن را دنبال می‌کند. همچنین برای ردگیری مسیر دنباله PN نیز از یک حلقه استفاده می‌کنند تا تغییرات را ردگیری کند [۱۴].

برای پیاده‌سازی دمدولاتور DSSS می‌توان از نرم افزار متلب استفاده کرد. به دلیل سرعت پایین، در کاربردهای عملی استفاده از متلب مناسب نبوده و بکار نمی‌آید [۱۵].

نیاز به پردازش با سرعت بالا و آنی بودن عملیات در گیرنده، استفاده از سخت‌افزار را در سیستم‌های طیف گسترده افزایش داده است. پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری در حوزه DSSS براساس نوع طراحی عمدتاً به دو روش مبتنی بر FPGA و DSP است [۱۶]-[۱۷].

علی‌رغم داشتن سرعت بالای پردازش و آنی بودن، استفاده از سخت‌افزار مستلزم هزینه‌هایی برای سازندگان است که این هزینه‌ها علاوه بر طراحی نرم‌افزاری، شامل قطعات سخت‌افزاری نیز می‌شود. در نتیجه یافتن راهی برای گریز از این هزینه‌ها، طراحان و سازندگان را با مفهوم جدیدی به نام SDR آشنا کرد. در بخش بعدی مفهوم SDR توضیح داده می‌شود.

۱-۱- معرفی SDR

⁸ Low probability Of Detection

⁹ Low probability Of Interception

¹⁰ Telemetry

¹¹ Telecommand

¹² Rake

¹ Direct Sequence Spread Spectrum

² Pseudo Noise

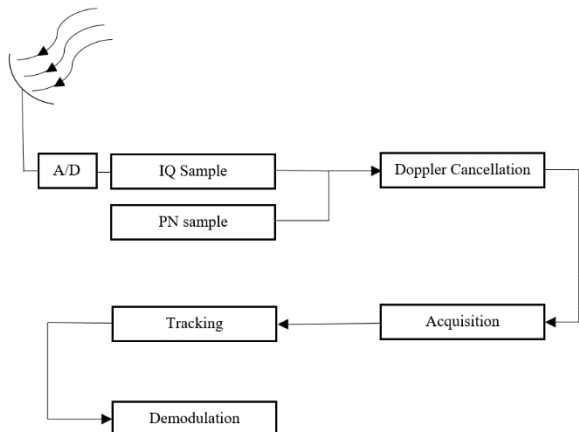
³ Acquisition

⁴ Tracking

⁵ Real-time

⁶ Software defined radio

⁷ Analog to Digital Converter



شکل ۱- بلوک دیاگرام گیرنده DSSS

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است سیگنال پس از دریافت از آنتن ابتدا بصورت تقریبی حذف داپلر شده و سپس رهیابی انجام و سیگنال وارد مرحله ردگیری می شود. سیگنال ردگیری شده سپس دمدوله و در صورت وجود کدینگ کانال بروی آن، کدگشایی می شود که در ادامه هریک از بلوکها توصیف می شود.

۱-۲- حذف داپلر

اگر سیگنالهای دریافتی از مدار پایین^{۱۷} (LEO) باشند، بسته به باند فرکانسی که سیگنال از آن ارسال می شود دارای نرخ تغییرات فرکانس داپلر زیادی هستند که در بلوکهای بعدی قابل رهگیری و حذف نیست. به همین خاطر قبل از وارد شدن به مراحل بعدی ابتدا باید فرکانس داپلر به صورت غیر دقیق^{۱۸} حذف شود. برای انجام این کار دو روش عمده وجود دارد که روش اول استفاده از روش توان دوم سیگنال و روش دوم استفاده از TLE است. برای بهره گیری از روش توان دوم باید تبدیل فوریه سیگنال توان دوم محاسبه شود که رابطه آن بصورت زیر است.

$$S(f) = \sum_I (r_n^2) e^{-j \frac{2\pi}{M} (i-1)(f-1)} \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

یک سیستم مخابرات رادیویی است که در آن اجزای یک سیستم رادیویی دیجیتال به جای پیاده سازی در سخت افزار، در یک نرم افزار که در یک کامپیوتر اجرا می شود، پیاده سازی می گردد [۱۸].

یک SDR ایده آل تنها با استفاده از یک نرم افزار قابل راه اندازی مجدد است و نحوه عملکرد آن به این صورت این است که بعد از آنتن یک ADC قرار می گیرد که سیگنال آنالوگ را به دیجیتال تبدیل کرده و سپس بقیه مراحل در نرم افزار و در یک سیستم پردازشی انجام می شود [۱۹].

همچنین در بخش فرستنده، نرم افزار یک سیگنال اطلاعاتی مدوله شده دیجیتال را تولید می کند که این سیگنال با عبور از یک مبدل دیجیتال به آنالوگ^{۱۲} (DAC) از طریق آنتن ارسال می شود. یکی از ابزارها برای پیاده سازی SDR ها GNU Radio نام دارد [۲۰].

GNU Radio یک نرم افزار منبع باز^{۱۴} بوده و یکی از معروف ترین ابزارهای پیاده سازی SDR است. این نرم افزار با استفاده از زبان های C++ و Python قابل توسعه است. برای اتصال GNU Radio به حوزه RF به یک واسط نیاز است که بدین منظور از ابزاری به نام USRP^{۱۵} استفاده می شود که قابلیت ADC/DAC را برای یک SDR مبتنی بر GNU Radio فراهم می کند. GNU Radio از تعدادی واحد پردازشی به نام بلوک تشکیل می شود. همچنین در این محیط بلوکهای جدید نیز قابل طراحی و پیاده سازی هستند. در این مقاله ابتدا ساختار گیرنده شرح داده شده و سپس به پیاده سازی دمدولاتور DSSS برای سیگنالهای دارای فرکانس داپلر با استفاده از GNU Radio و در نهایت به بررسی نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری پرداخته می شود.

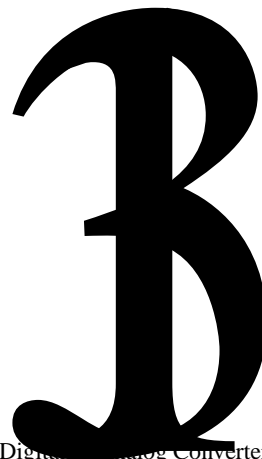
۲- ساختار گیرنده

با فرض این که سیگنال دریافتی با r_n نمایش داده شود، r_n بصورت زیر قابل نمایش است.

$$r_n = A b_n p_n e^{j 2\pi f_n n} + v_n \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

که در آن A دامنه سیگنال، b_n داده ورودی، p_n دنباله PN، f_n مقدار داپلر، τ میزان شیفت و v_n نویز سفیدگوسی جمع شونده^{۱۶} (AWGN) است و از سایر اثرات تداخلی صرف نظر می شود.

در حالت کلی بلوک دیاگرام گیرنده DSSS در شکل ۱ نشان داده شده است.



¹⁷ Low Earth Orbit

¹⁸ Coarse

¹⁴ Digital-to-Analog Converter

¹⁵ Open-Source

¹⁶ Universal Software Radio Peripheral

¹⁷ Additive White Gaussian Noise

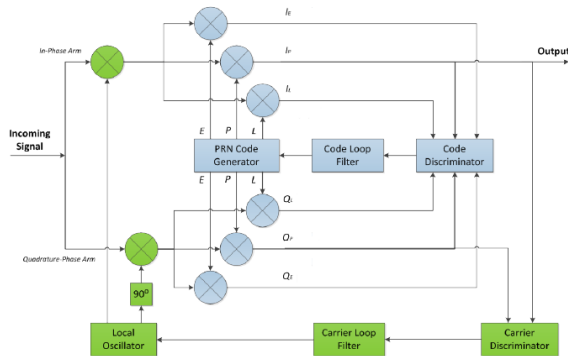
منظور از این مرحله حذف دنباله PN از روی سیگنال و رسیدن به محتوای اصلی است. در این مرحله باید فرکانس و دنباله PN را همزمان ردگیری کرده که این کار به ترتیب بوسیله حلقه قفل فرکانس^{۱۹} (FLL) و حلقه قفل تأخیر^{۲۰} DLL انجام می‌شود. فرایند FLL با استفاده از یک حلقه قفل فاز^{۲۱} (PLL) مرتبه‌ی دوم و یک حلقه کاستاس^{۲۲} انجام می‌شود. ممیز^{۲۳} با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D = \tan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (۴)$$

که در آن $I = \text{Re}\{r_n \cdot p_n\}$ و $Q = \text{Im}\{r_n \cdot p_n\}$ و \tan معکوس \tan است. خروجی این مرحله وارد PLL شده و تغییرات فرکانس ردگیری می‌شود. برای ردگیری دنباله PN از یک DLL کمک گرفته می‌شود که با استفاده از روش دروازه ارلی (early) - لیت (late) انجام می‌شود.

$$D = \frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)} \quad (۵)$$

که در آن $Q_E = \text{Im}\{r_n\} * p_{n, \text{early}}$ ، $I_E = \text{Re}\{r_n\} * p_{n, \text{early}}$ ، $Q_L = \text{Im}\{r_n\} * p_{n, \text{late}}$ و $I_L = \text{Re}\{r_n\} * p_{n, \text{late}}$ است که $p_{n, \text{late}}$ و $p_{n, \text{early}}$ به ترتیب بخش‌های ارلی و لیت دنباله PN هستند. خروجی DLL نیز برای ردگیری دنباله PN وارد یک حلقه شده و دنباله PN ردگیری می‌شود. شکل ۴ نحوه انجام فرایند ردگیری را برای یک سیگنال DSSS نشان می‌دهد.



شکل ۴- الگوریتم مرحله Tracking

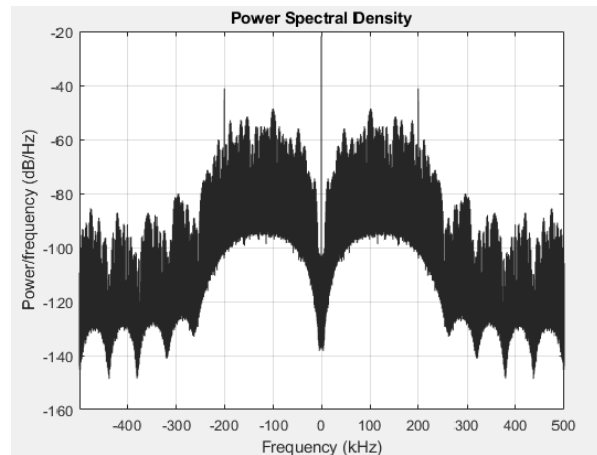
۴-۲- دمدوله کردن

سیگنال‌ها پس از ردگیری در مرحله قبل با استفاده از یک PLL با تابع تبدیل زیر به سمبل تبدیل و سپس در صورت وجود کدینگ بر روی آن‌ها وارد مرحله‌ی کدگشایی می‌شود.

$$H(s) = \frac{2\xi\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (۶)$$

۳- پیاده سازی در GNU Radio

با توجه به بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۱ بلوک‌های مربوط به هریک از مراحل باید در GNU Radio پیاده‌سازی شوند. بلوک دیاگرام گیرنده DSSS در GNU Radio در شکل ۵ نشان داده شده است. باید



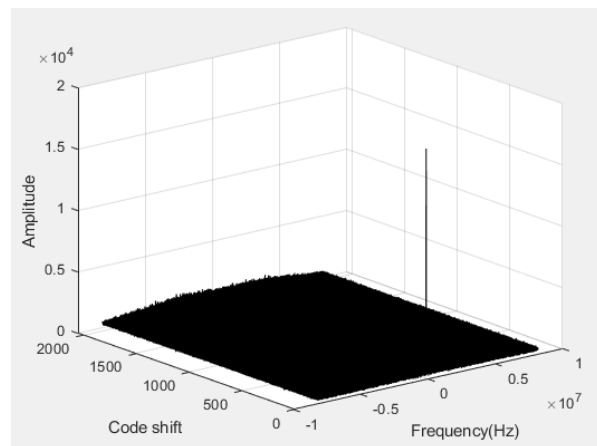
شکل ۲- نمایش توان دوم سیگنال

روش دومی که مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از TLE است. TLE یک المان دوخطی است که اطلاعات حرکتی ماهواره را می‌دهد. همانطور که بیان شد استفاده از TLE زمانی امکان‌پذیر است که سیگنال دریافتی ماهواره‌ای بوده و TLE آن در دسترس باشد.

۲-۲- ره‌یابی

پس از حذف داپلر باید آفست بین سیگنال دریافتی یعنی r_n و سیگنال دنباله PN یعنی p_n پیدا شود که این مورد شامل آفست‌های دنباله PN فرکانس تخمین زده شود که به این مرحله ره‌یابی می‌گویند. در واقع تخمین این دو پارامتر این مرحله با به‌منظور سنکرون‌سازی اولیه بین سیگنال دریافتی و دنباله PN از لحاظ زمانی و تخمین شیفت فرکانسی بکار می‌رود. برای انجام ره‌گیری روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از متداول‌ترین روش‌ها اجرای تابع همبستگی در دو بعد زمان و فرکانس است که با توجه به امکانات پردازشی در دسترس به روش‌های مختلف قابل انجام است.

$$S(f, \tau) = \sum_i \sum_j p_{(i,j)} r_{(i+j, \tau)}^* \quad i, j = 1, 2, \dots \quad (۳)$$



شکل ۳- نمایش مرحله ره‌یابی سیگنال دریافتی

۳-۲- ردگیری

²² Costas Loop

²³ Discriminator

¹⁹ Frequency Locked Loop

²⁰ Delay Locked loop

²¹ Phase locked loop

با مقایسه نمودار به دست آمده با تئوری، مشاهده می‌شود که خروجی به میزان 1dB از تئوری فاصله دارد که به دلیل تلفات ناشی از کانال، خطای باقیمانده از حذف داپلر دمدولاتور و... باشد که مقدار اختلاف بدست آمده عددی ایده‌آل است.

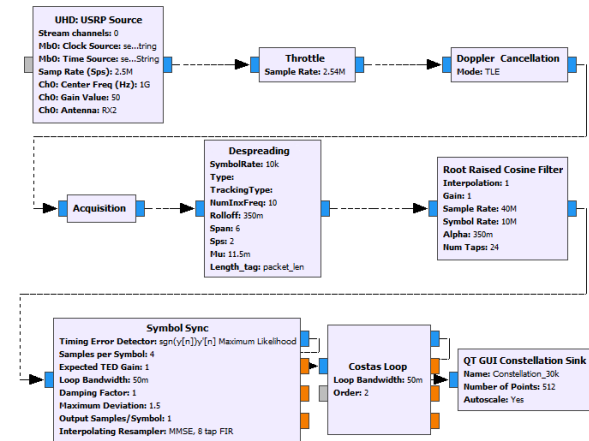
۴- نتیجه گیری

دمدولاتور DSSS پیاده‌سازی شده در حوزه GNU Radio می‌تواند بصورت آنی پردازش را انجام داده و مشکل نرم افزار متلب را حل کند. همچنین به دلیل انجام پردازش به صورت نرم افزاری و عدم نیاز به سخت افزار، از لحاظ هزینه‌های پیاده‌سازی سخت‌افزاری حذف شده و فقط نیاز به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال داریم. همچنین از لحاظ عملکردی نیز الگوریتم با 1dB فاصله از تئوری عملکردی مناسب دارد.

۵- مراجع

- [1] X. Liping, X. Chengqian and Z. Wenguang, "Performance Analysis of the DSSS System Based on Sequence Pairs," 2006 First International Conference on Communications and Networking in China, 2006, pp. 1-4, doi: 10.1109/CHINACOM.2006.344885.
- [2] S. Zhou, G. B. Giannakis, and A. Swami, "Digital multi-carrier spread spectrum versus direct sequence spread spectrum for resistance to jamming and multipath," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 643_655, May 2002.
- [3] M. A. Munir and A. R. M. Maud, "Direct-sequence spread spectrum with variable spreading sequence for jamming immunity," in *Proc. 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol.*, Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 933_937.
- [4] A. Sajid, A. Habib, S. Ali, and S. Ejaz, "Development of multi-user TDMA-based DSSS system," in *Proc. 2nd Int. Conf. Commun., Comput. Digit. Syst.*, Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 1_5.
- [5] A. Tayebi, S. Berber, and A. Swain, "Security enhancement of x chaotic- DSSS in WSNs," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 816_819, Apr. 2018.
- [6] C. Boudier, S. Azou, and G. Burel, "Performance analysis of a spreading sequence estimator for spread spectrum transmissions," *J. Franklin Inst.*, vol. 341, no. 7, pp. 595_614, Nov. 2004.
- [7] M. K. Tsatsanis and G. B. Giannakis, "Blind estimation of direct sequence spread spectrum signals in multipath," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, no. 5, pp. 1241_1252, May 1997.
- [8] W. Xia, Y. Zhou, and Q. Meng, "Run-length method for determining the segmentation length based on the segmentation long-code blind estimation," *IET Signal Process.*, vol. 10, no. 7, pp. 732_736, Apr. 2016.
- [9] T. Zhang, S. Dai, W. Zhang, G. Ma, and X. Gao, "Blind estimation of the PN sequence in lower SNR DS-SS signals with residual carrier," *Digit. Signal Process.*, vol. 22, no. 1, pp. 106_113, Jan. 2012.
- [10] F. Dominique and J. H. Reed, "Simple PN code sequence estimation and synchronisation technique u

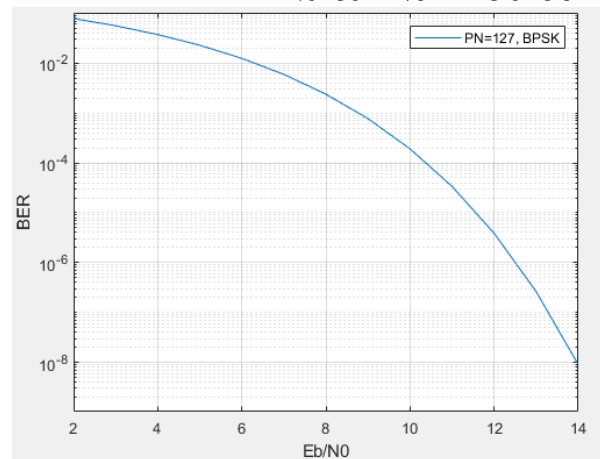
توجه داشت که در بلوک حذف داپلر هر دو روش TLE و توان دوم قابل انتخاب هستند. همچنین این بلوک دیاگرام به هر دو حالت برون‌خط^{۲۴} و برون‌خط^{۲۵} قابل پیاده‌سازی است.



شکل ۵- بلوک دیاگرام پیاده‌سازی روش DSSS در GNU Radio

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی

دنباله PN تولیدی از نوع m-sequence و با طول 127 است. همچنین مدولاسیون استفاده شده از نوع کلید زنی شیفیت فاز دوتایی^{۲۶} (BPSK) با نرخ داده^{۲۷} ورودی 10kbps و نرخ چیب^{۲۸} 1.27Mcps است. برای انجام آزمایش سیگنال با مقادیر $\frac{E_b}{N_0}$ مختلف تولید شده و خروجی آن برحسب مقدار BER اندازه‌گیری می‌شود. بهره پردازشی که با PG نمایش داده می‌شود، با رابطه $PG = 10 \times \log_{10} \frac{\text{chip rate}}{\text{bit rate}}$ قابل بیان است که برای سیگنال ساخته شده $PG \approx 21dB$ علاوه بر این ۱۰۰ آزمایش مونت کارلو برای بررسی نتایج بکار رفته است. شکل ۶ نمودار BER برحسب $\frac{E_b}{N_0}$ را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که مقادیر $\frac{E_b}{N_0}$ نشان داده شده در شکل مربوط به بعد از اضافه شدن بهره پردازشی است. در تست زیر به دلیل در دسترس نبودن TLE از پیک توان دوم استفاده شده است.



شکل ۶- نمودار BER برحسب E_b/N_0 برای طول ۱۲۷

²⁷ Bit Rate

²⁸ Chip Rate

²⁴ Offline

²⁵ Online

²⁶ Binary Phase Shift keying

- sing the constrained Hebbian rule," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 37_38, Jan. 1997.
- [11] F. Dominique and J. H. Reed, "Subspace based PN code sequence estimation for direct sequence signals using a simplified Hebb rule," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 13, pp. 11_19, Jul. 1997.
- [12] C. Boudier and G. Burel, "Spread spectrum codes identification by neural networks," in *Proc. 4th World Multiconf. Circuits, Syst., Commun. Comput. (CSCC)*, Vouliagmeni, Greece, 2000, pp. 257_262.
- [13] Kyungwhoon Cheun, "Performance of direct-sequence spread-spectrum RAKE receivers with random spreading sequences," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 9, pp. 1130-1143, Sept. 1997, doi: 10.1109/26.623079.
- [14] Sandip Sudani¹., Dhaval Upadhyay² and Pravin Patidar³, "IMPLEMENTATION OF ACQUISITION & TRACKING ALGORITHMS OF SPREAD SPECTRUM SIGNALS IN HIGH DYNAMIC SCENARIO," *International Journal of Current Advanced Research* Vol 5, Issue 3, pp 643-648, March 2016.
- [15] Haotian Yang, Bin Zhou, Lixin Wang, Qi Wei, Rong Zhang, "Design and implementation of an open-source MATLAB code for GNSS/MEMS-INS deep integrated navigation," *Volume 242*, 2021, 166987, ISSN 0030-4026.
- [16] Qingbo Chen, Min Zhang, Z. Ghassemlooy, Pengfei Luo, Dahai Han and Bo Zhang, "Implementation and experimental demonstration of a real-time 7-DSSS VLC system based on FPGA," 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOON.2016.7875635.
- [17] Y. R. Zheng, Z. Yang, M. Yue, B. Han, Z. Chen and J. Wang, "DSP implementation of direct-sequence spread spectrum underwater acoustic modems with networking capability," 2014 Oceans - St. John's, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANS.2014.7003035.
- [18] Rodger H. Hosking, "Software Defined Radio Handbook, pages 7-10," Pentek, Inc, Upper Saddle River, NJ, 8th edition, Jan 2010
- [19] J. Mitola. "The Software Radio Architecture," *Communications Magazine*, IEEE, 33(5):26-38, May 1995
- [20] Free Software Foundation, "Welcome to GNU Radio [Online]." Available: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>.