

# Design and Optimization of Satellite Telecommunication Relay Using Pseudo-Noise Ranging

Afshin Eskandari<sup>1</sup> and S. Hassan Sedighy<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Student, School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
2. Associate Professor, School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*Corresponding Author's E-mail: sedighy@iust.ac.ir

## Abstract

In this article, the optimization and implementation of a satellite telecommunication relay for ranging applications is presented. To optimize the performance of this telecommunication relay, a distance measuring system is modeled in MATLAB software according to DSN standard architecture. In this system, the nonlinear effects of the mixer, the local oscillator phase noise and the system noise figure are investigated as important design variables. The simulation results confirm that the designed relay satisfies the requirements of a ranging system based on the CCSDS and DSN standards. The results of the implemented relay system also confirm the design. This relay system can be used in local ground station ranging systems.

**Keywords:** Telecommunication relay, Satellite ranging, Guidance and navigation subsystem, TT&C Subsystem

## 1. Introduction

In the satellite control and navigation center, it is very important to have an accurate satellite orbit model. This information allows the satellite control and navigation team to make the best decision in different conditions. Therefore, accurately determining the position of a satellite relative to the ground station and updating the orbital model with this information is a fundamental requirement for space navigation.

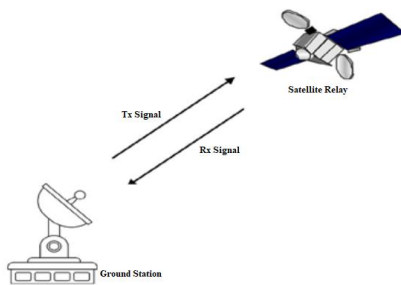


Figure 1. Two-way ranging

In this article, two-way ranging is chosen as a suitable method for LEO satellites as shown in Figure (1). To reduce the hardware complexity, and considering the good SNR in LEO satellites, transparent relays are used. Due to the newer ranging method with pseudo-noise signal, which is standardized according to the digital hardware used in today's satellites and the common receiving equipment in the ground station, and is less vulnerable to noise and other interference, the pseudo-noise signal is chosen.

CCSDS and DSN standards have been chosen as criteria in the selection of sequence and system architecture in simulations. Both DSN and CCSDS standards use a similar series of components to form their ranging sequence, which was calculated by Titsworth [1-6].

## 2. Design and simulation

Transparent relays are not a new issue, but their performance has not been investigated for ranging and the effect of different transparent relay parameters on the performance of such a system. Therefore, the effects of different relay parameters on the performance quality of ranging systems should be investigated. Then, based on the obtained results, the most optimal parameters are selected. In order to investigate these effects, the entire ranging chain is simulated by using MATLAB Simulink software.

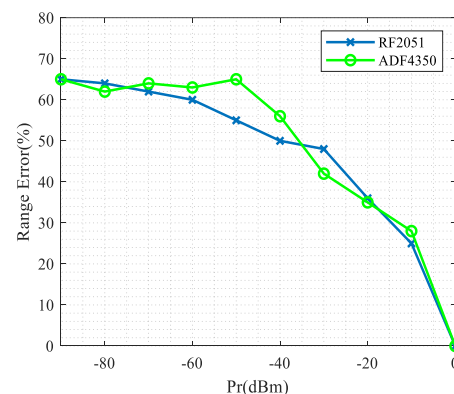


Figure 2. Effect of non-ideal mixer parameters



## COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. 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/).

## How to cite this article:

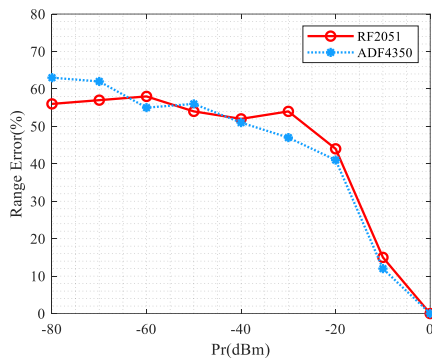
A. Eskandari and S. H. Sedighi, "Design and Implementation of Transparent Pseudo-Noise Satellite Ranging Relay," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 45-56, 2022 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1378>.

For simulation with real values, the available parts for mixer and local oscillator were checked and two mixers RF2051 and ADE-35MH+ are selected for the test. Figure 2 is obtained by replacing the ideal values with the values of Table 1 by considering the relay system as non-ideal.

**Table 1-Mixer non-ideal parameters for simulation [8, 9]**

	Parameter	RF2051	ADE-35MH+
1	Gain(dB)	-2	-7
2	Noise figure(dB)	12	(Passive)
3	OIP3(dBm)	inf	+18

The next effect added to the simulation is the phase noise of the local oscillator. Figure 3 depicts the phase noise of RF2051 and ADF4350 effects on the amount of system error in terms of SNR received in the ground station receiver.



**Figure 3. Range error due to LO phase noise**

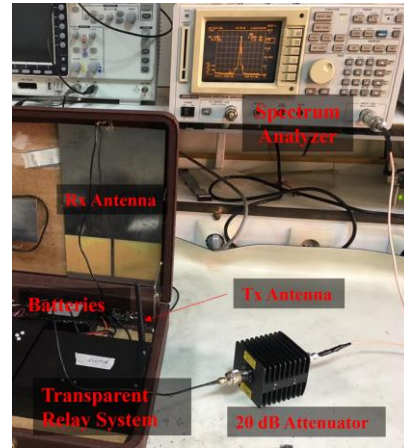
### 3. Implementation, testing and verification

Based on the parameters analysis, the optimal system is implemented and integrated with antennas and other required parts. Table 2 shows the relay system specification. Due to the non-availability of a reference ranging system, the effect of the relay operation on the value of the bit error rate in a digital receiver is considered to verify the design and performance of the relay. For this purpose, an existing data transmitter and receiver link with GMSK modulation and the ability to send a data rate of up to 1Mb/s has been used [11].

**Table 2-Transparent relay specification**

	Parameter	Value
1	Frequency Band	L
2	Channel Bandwidth	2 MHz
3	Channel Number	5
4	Gain	40 dB
5	Noise figure(dB)	1 dB
6	DC Power Consumption	6 W

The bit error rate and sensitivity of radio link are measured as reference. The obtained results indicate that the addition of the optimally designed relay system does not have a negative effect on the performance of the radio link. The bit error rate in both modes is better than  $10^{-5}$  in the input power less than -91 dBm. Figure 4 depicts the relay system test setup.



**Figure 4. Integrated system output power measurement**

### 4. Conflict of Interest

There is no conflict of interest by the authors.

### 5. References

- [1] Pseudo-Noise (Pn) Ranging Systems, CCSDS, 2014.
- [2] Pseudo-Noise and Regenerative Ranging, DSMS, 2004.
- [3] Sequential Ranging, DSN, 2009.
- [4] J. B. Berner, S. H. Bryant, and P. W. Kinman, "Range Measurement as Practiced in the Deep Space Network," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 11, pp. 2202-2214, 2007, doi: 10.1109/jproc.2007.905128.
- [5] J. B. S. H. Bryant, "Operations comparison of deep space ranging types: Sequential tone vs. pseudo-noise," in IEEE Aerospace Conference, 2002: IEEE.
- [6] J. L. Massey, G. Boscagli, and E. Vassallo, "Regenerative pseudo-noise-like (PNL) ranging sequences for deep-space missions," International Journal of Satellite Communications and Networking, vol. 25, no. 3, pp. 305-322, 2007.
- [7] R.C. Tittsworth, "Optimal ranging codes," IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry, vol. 10, no. 1, pp. 19-30, 1964.
- [8] RF2051.[Online]Available:<https://www.qorvo.com/products/p/RF2051>.
- [9] ADE-35MH+.[Online]Available:<https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ADE35MH%2B>.
- [10] ADF4350.[Online]Available:<https://www.analog.com/en/products/adf4350.html>.
- [11] Simultaneous transmission of GMSK telemetry and PN ranging, CCSDS, 2017.

# طراحی و بهینه‌سازی رله مخابراتی ماهواره با کاربرد فاصله‌سنجی شبه‌نوین

افشین اسکندری<sup>۱</sup> و سیدحسن صدیقی<sup>۲\*</sup>

دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*ایمیل نویسنده مخاطب: [sedighy@iust.ac.ir](mailto:sedighy@iust.ac.ir)

## چکیده

بهینه‌سازی و پیاده‌سازی یک رله مخابراتی ماهواره با کاربرد فاصله‌سنجی در این مطالعه ارائه شده است. برای بهینه‌سازی عملکرد این رله مخابراتی، یک سامانه فاصله‌سنجی مطابق با معماری استاندارد DSN در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. در این سامانه اثرات غیرخطی میکسر، نویز فاز نوسانگر محلی و عدد نویز سامانه به عنوان متغیرهای مهم طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌کند که رله طراحی شده الزامات یک سامانه فاصله‌سنجی براساس استاندارد CCSDS و DSN را اکتفا می‌کند. نتایج سامانه رله پیاده‌سازی شده نیز تأییدکننده طراحی است. این سامانه رله قابلیت بکارگیری در سامانه‌های فاصله‌سنجی ایستگاه زمینی بومی را دارد.

واژه‌های کلیدی: رله مخابراتی، فاصله‌سنجی، ماهواره، زیرسیستم هدایت و ناوبری، زیرسیستم ردیابی و دورسنجی

موقعیت یک ماهواره نسبت به ایستگاه زمینی و به‌روز کردن مدل مداری با این اطلاعات برای ناوبری فضایی یک نیاز اساسی است.

به تعیین فاصله بین ایستگاه زمینی و ماهواره فاصله‌سنجی گفته می‌شود. رکن اصلی فاصله‌سنجی ماهواره مانند بسیاری از فاصله‌سنجی‌های الکترونیکی، اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت یک شکل موج خاص، تا هدف مشخص است. در روش‌های استاندارد فاصله‌سنجی ماهواره از امواج رادیویی ماکروویو استفاده می‌شود [۱-۵] اما در برخی از روش‌های ردیابی فضایی از امواج نوری نیز استفاده می‌شود [۶-۹].

در همه‌ی روش‌های فاصله‌سنجی، اندازه‌گیری فاصله توسط مدوله کردن لینک بالارو با یک سیگنال تناوبی خاص و مشخص آغاز می‌شود. گام بعدی بازرسان آن توسط ماهواره است تا سیگنال به ایستگاه زمینی برگردد. پس تشخیص و آشکارسازی آن در لینک پایین‌رو، محاسبه زمان تأخیر رفت و برگشت به عنوان گام پایانی صورت می‌گیرد. بدیهی است که مقدار تأخیر زمانی با سرعت حرکت یک موج الکترومغناطیس در خلأ به فاصله مرتبط می‌شود.

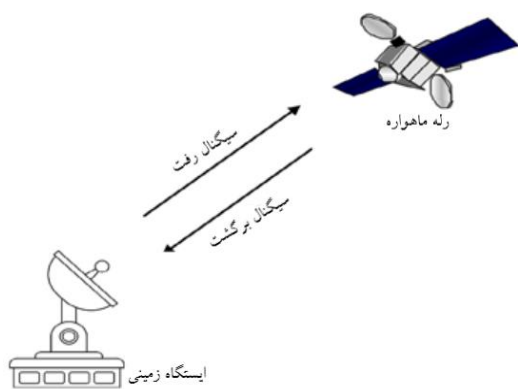
## علائم و اختصارات

Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS)	کمیته مشورتی سیستم‌های داده فضایی
Deep Space Network (DSN)	شبکه فضایی عمیق
dB	دسی‌بل
Hz	هرتز
T4B	رای‌گیری با وزن ۴ متعادل تاثر
T2B	رای‌گیری با وزن ۲ متعادل تاثر

## مقدمه

در مرکز کنترل و ناوبری ماهواره داشتن مدل مداری دقیق ماهواره اهمیت بالایی دارد. این اطلاعات امکان اخذ بهترین تصمیم را در شرایط مختلف به تیم کنترل و ناوبری می‌دهد؛ بنابراین تعیین دقیق

همانطور که در شکل (۱) مشخص است، در روش مدنظر حامل لینک بالارو در زیرسیستم فاصله‌سنجی ایستگاه زمینی توسط یک سیگنال فاصله‌سنجی شبه‌نوین مدولاسیون فاز و ارسال می‌شود. این سیگنال در گیرنده-فرستنده ماهواره روی لینک پایین‌رو مدوله شده و به همان ایستگاه زمینی رله می‌شود. در صورتی که این روش به صورت هم‌دوس<sup>۸</sup> پیاده‌سازی شده باشد، گیرنده-فرستنده ماهواره از یک تکنیک قفل فاز استفاده می‌کند تا اطمینان حاصل شود که حامل‌های لینک پایین‌رو و بالارو با یکدیگر هم‌دوس هستند. اطلاعات سیگنال ارسالی و دریافتی در ایستگاه زمینی ذخیره شده و از روی آن تأخیر رفت و برگشت سیگنال و فاصله اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱- فاصله‌سنجی دوطرفه

با نسل‌های جدیدی از مأموریت‌های فضایی برای کاوشگرهای بین سیاره‌ای، فرآیندهای پیچیده تزریق مداری، جمع‌آوری داده‌های رادیو علوم یا ارسال کاوشگر به سیارات دورتر، نیاز به دقت بیشتر در فاصله‌سنجی ایجاد شد. در طی فعالیت‌های ذکر شده سیگنال فاصله‌سنجی متحمل تلفات مسیر بیشتر می‌شود و چالشی برای صحت فاصله‌سنجی ایجاد می‌کند. برای رفع این نیاز، روش‌های فاصله‌سنجی جدید بر پایه سیگنال‌های شبه‌نوین در دستور کار آژانس‌های فضایی قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۴ هنگامی که نیازهای اولیه مأموریت فضایی‌های بی‌کلمبو<sup>۹</sup> به عطارد ارزیابی شد، مشخص شد که آزمایش‌های رادیو علوم<sup>۱۱</sup> نیاز به تعیین دقت مدار بهتری از الزامات ناوربی در گذشته دارد، در همان دوره زمانی، ناسا برای مأموریت نیو هورایزنز<sup>۱۲</sup> خود به سیاره پلوتو با مسئله مشابهی روبه‌رو شد. در نتیجه فاصله‌سنجی‌های با دقت بالاتر در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر به یک نیاز تبدیل شد. در راستای تحقیقات، توافقاتی برای تهیه استاندارد فاصله‌سنجی با فرستنده-گیرنده بازسازی‌کننده تحت نظارت کمیته مشورتی سیستم‌های داده فضایی حاصل شد. این تحقیقات

اولین تفاوت در روش‌های مختلف فاصله‌سنجی، نحوه بازارسال سیگنال فاصله‌سنجی لینک بالارو توسط سخت‌افزار فرستنده-گیرنده<sup>۳</sup> روی ماهواره است. این بازارسال می‌تواند شفاف<sup>۴</sup> یا بازسازی‌کننده<sup>۵</sup> باشد. تفاوت بعدی تعداد ایستگاه‌های درگیر در یک فرآیند فاصله‌سنجی است. زمانی که ایستگاه زمینی فرستنده سیگنال فاصله‌سنجی و ایستگاه گیرنده سیگنال باز ارسال شده توسط ماهواره یکسان هستند فاصله‌سنجی، دوطرفه نامیده می‌شود و در صورتی که ایستگاه فرستنده و گیرنده متفاوت باشند فاصله‌سنجی، سه‌طرفه نامیده می‌شود. فاصله‌سنجی سه‌طرفه زمانی مفید است که مقدار تأخیر رفت و برگشت آنقدر زیاد است که هنگام برگشت سیگنال فاصله‌سنجی، ایستگاه زمینی اول دیگر در رؤیت ماهواره قرار ندارد. مانند مأموریت‌های فضای عمیق [۱۰]. فاصله‌سنجی یک‌طرفه نیز یکی از روش‌هاست. در این روش یک لحظه زمانی مرجع و از پیش معین وجود دارد که ماهواره سیگنال فاصله‌سنجی را در آن لحظه به ایستگاه زمینی ارسال می‌کند. تأخیر دریافت این سیگنال تنها زمانی معتبر است که ساعت ماهواره و ایستگاه زمینی همگام باشند [۱۱، ۱۲]. در صورت نیاز به فاصله‌سنجی یک‌طرفه بدون سخت‌افزار همگام‌ساز ساعت، می‌توان از نوع دیفرانسیلی یک طرفه استفاده کرد [۱۳].

سیگنال‌های متفاوتی برای انجام فاصله‌سنجی طراحی و تحلیل شده است اما اساس همه آن‌ها، مدولاسیون یک نشانگر زمان<sup>۶</sup> بر روی لینک بالاروست که پس از آن توسط گیرنده در لینک پایین‌رو شناسایی می‌شود. سیگنال طراحی شده برای فاصله‌سنجی ماهواره نقش مهمی در تعیین سخت‌افزار و نرم‌افزار ایستگاه زمینی و ماهواره دارد. سیگنال‌های استاندارد شده در دو دسته شبه‌نوین<sup>۷</sup> و ترتیبی<sup>۸</sup> قرار می‌گیرند [۱۴-۱۶]. فرض کاربرد رله در ماهواره‌های ساخت ایران، که از نوع ماهواره‌های نزدیک زمین هستند باعث می‌شود تا فاصله‌سنجی از نوع دو طرفه کافی باشد و نیازی به فاصله‌سنجی سه طرفه وجود ندارد. برای کاهش پیچیدگی‌های سخت‌افزاری و با توجه سیگنال به نویز خوب در ماهواره‌های نزدیک زمین استفاده از رله شفاف در ماهواره توصیه می‌شود. با توجه به جدیدتر بودن روش فاصله‌سنجی با سیگنال شبه‌نوین که متناسب با سخت‌افزارهای دیجیتال استفاده شده در ماهواره‌های امروزی و تجهیزات رایج دریافت در ایستگاه زمینی استاندارد شده است و آسیب پذیری کمتری نسبت به نویز و سایر اختلالات دارد، سیگنال شبه‌نوین انتخاب شد.

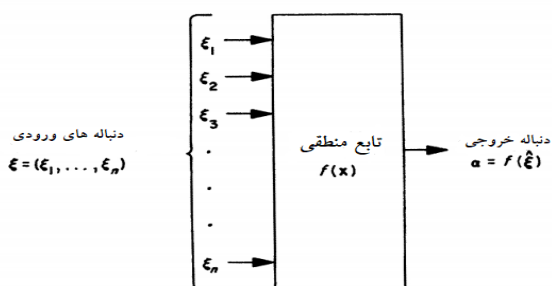
### فاصله‌سنجی شبه‌نوین دوطرفه شفاف

متداول‌ترین نوع اندازه‌گیری فاصله، فاصله‌سنجی دو طرفه است.

8 . Sequential  
9 . Coherent  
10 . BepiColombo  
11 . Radio-Science  
12 . New Horizons

3 . Transponder  
4 . Non-Regenerative  
5 . Regenerative  
6 . Time marker  
7 . Pseudo Noise

اگر تابع درستی برای ترکیب دنباله‌ها استفاده شده باشد (به عنوان مثال تابع اکثریت)، دنباله نهایی شرط سوم را نیز دارد. به این صورت که اگر مقدار تأخیر (یا شیفت کد دودویی) برابر مضربی از طول یک مؤلفه باشد مقدار تابع همبستگی<sup>۱۴</sup> دنباله شبه‌نوین تشکیل شده، با آن مؤلفه بیشینه است. این ویژگی امکان می‌دهد تا تغییر فاز نسبت به هر مؤلفه با حداکثر  $\lambda_n$  بار انجام همبستگی به دست بیاید. در این صورت بیشینه تعداد همبستگی‌های انجام شده برای پیدا کردن تغییر فاز همه مؤلفه‌ها و در نتیجه پیدا کردن تأخیر کد برابر حاصل جمع طول مؤلفه‌ها ست.



شکل ۳- بلوک دیاگرام تشکیل کد شبه‌نوین

در نهایت CSDS با ارزیابی عملکرد سامانه‌های فاصله‌سنجی بر اساس چندین معیار اصلی از جمله: دقت اندازه‌گیری فاصله، زمان دستیابی، تداخل در دور سنجی/فرمان و پیاده‌سازی سخت‌افزاری، توصیه‌هایی برای دو مورد سیگنال فاصله‌سنجی شبه‌نوین با سخت‌افزار فرستنده-گیرنده روی ماهواره بازسازی شونده ارائه می‌دهد. در یکی از سیگنال‌های توصیه شده اولویت دقت فاصله‌سنجی است و در دیگری زمان دستیابی اولویت می‌باشد. همچنین برای فاصله‌سنجی با سخت‌افزار فرستنده-گیرنده شفاف روی ماهواره (غیراحیاکننده) توصیه‌هایی ارائه شده است [۱-۴].

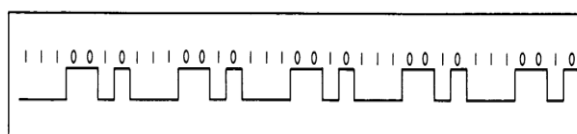
#### جدول ۱- مؤلفه‌های تراژورث

(n)	(L <sub>i</sub> )	یک دوره از دنباله (از چپ به راست)
۱	۲	۰، ۱
۲	۷	۰، ۰، ۰، ۱، ۱، ۰، ۱
۳	۱۱	۰، ۰، ۰، ۱، ۱، ۱، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱
۴	۱۵	۰، ۰، ۰، ۱، ۱، ۱، ۱، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱
۵	۱۹	۰، ۰، ۰، ۱، ۱، ۱، ۱، ۱، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱
۶	۲۳	۱، ۱، ۰، ۰، ۰، ۰، ۱، ۱، ۱، ۱، ۰، ۰، ۱، ۱، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱

هر دو استاندارد DSN و CCSDS از یک سری مؤلفه مشابه برای تشکیل دنباله فاصله‌سنجی خود بهره می‌برند که توسط تراژورث<sup>۱۵</sup> محاسبه شده است [۲۴]. توالی‌های شش‌گانه در جدول (۱) نشان داده شده است. دو کد

بر روی سیگنال‌های بر پایه دنباله شبه‌نوین یا شبه شبه‌نوین متمرکز بود. همچنین امکان استفاده از همین سیگنال‌ها در مأموریت‌هایی با نیاز کمتر و با یک فرستنده-گیرنده شفاف در CCSDS بررسی شد [۲۲-۱۷].  
سیگنال فاصله‌سنجی شبه‌نوین یک شکل موج دودویی تناوبی است که از تکرار پیوسته یک دنباله دودویی شبه‌نوین تشکیل شده است. شکل (۲) یک دنباله شبه‌نوین با طول ۷ و شکل موج متناظر آن را نشان می‌دهد. اگر یک دنباله دودویی بخواهد برای فاصله‌سنجی مناسب باشد باید سه ویژگی زیر را داشته باشد [۲۳]:

- دوره زمانی دنباله باید از زمان رفت و برگشت سیگنال تا ماهواره در دورترین فاصله مورد نظر، بیشتر باشد. این امر موجب ابهام نداشتن در فاصله‌سنجی می‌شود.
- تغییرات فاز کد باید متناسب با قدرت تفکیک مورد نیاز قابل اندازه‌گیری باشد. این امر معادل به اندازه کافی کوچک بودن دوره هر رقم<sup>۱۳</sup> کد است.
- تغییرات فاز کد باید در زمان کوتاه قابل دستیابی باشد. یعنی باید بتوان کد ارسالی را با کد دریافت شده در مدت زمان منطقی‌ای تطبیق داد و مقدار تغییر فاز آن را پیدا کرد.



شکل ۲- دنباله دودویی شبه‌نوین و شکل موج آن [۲۳]

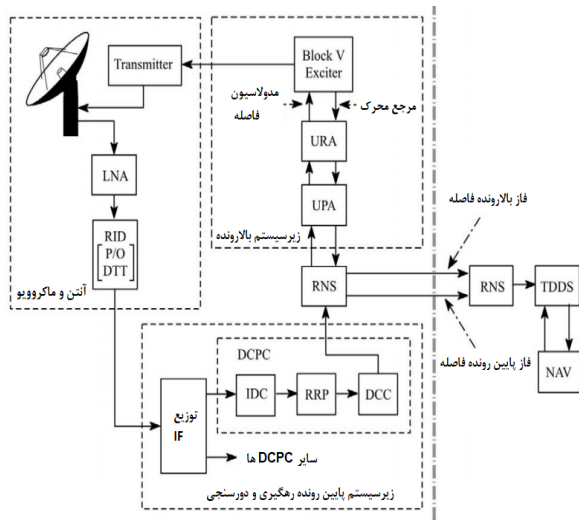
اگر چند دنباله با دوره‌های اول نسبت به هم به صورت رقم به رقم مانند شکل (۳) ترکیب شوند، دوره دنباله نهایی برابر ضرب دوره‌های تک تک کدهای استفاده شده است:

$$\lambda_i = \prod_{n=1}^N \lambda_n \quad (1)$$

که در آن  $\lambda_n$  طول مؤلفه  $n$ -م،  $N$  تعداد مؤلفه‌های استفاده شده در دنباله نهایی و  $\lambda_i$  طول یا همان دوره دنباله نهایی است. معادله (۱) نشان می‌دهد که با یک دنباله شبه‌نوین طولانی ساخته شده از مؤلفه‌های کوتاه می‌توان به دو شرط اول و دوم رسید. اولین مؤلفه دنباله، کلاک فاصله‌سنجی نام دارد که یک دنباله صفر و یک پیاپی با دوره نصف عرض تراشه است. هدف از مؤلفه‌های بعدی حل ابهام است. با استفاده از تعداد بیشتری مؤلفه در تشکیل دنباله نهایی قدرت حل ابهام دنباله افزایش می‌یابد اما هزینه آن افزایش زمان لازم برای محاسبه همبستگی‌هاست.

به دست آمده، بهینه‌ترین گزینه براساس شاخص ارزیابی ارائه انتخاب می‌شود. به منظور بررسی این اثرات کل مجموعه فاصله‌سنجی که بخشی از آن در ایسگاه زمینی و رله آن در ماهواره قرار دارد به کمک نرم‌افزار سیمولینک و متلب شبیه‌سازی شد. در گام اول مدل‌سازی ایستگاه زمینی سامانه فاصله‌سنجی، انجام شد. شکل (۵) معماری یک سامانه فاصله‌سنجی مطابق با اسناد استاندارد شبکه فضایی عمیق است که در مدل‌سازی به عنوان معماری معیار استفاده شده است.

این معماری شامل چند بخش اصلی، قسمت جلویی<sup>۱۶</sup> زیرسیستم لینک بالارو و زیرسیستم تله‌متری و ردیابی لینک پایین‌رو است. جزئیات بیشتر در [۲۶، ۲۵] ارائه شده است.



شکل ۵- معماری سامانه فاصله‌سنجی DSN [۵]

وظیفه تولید سیگنال فاصله‌سنجی به عهده تجهیز فاصله‌سنجی لینک بالارو می‌باشد. این تجهیز قبل از ارسال سیگنال به مدولاتور، فاز آن را اندازه‌گیری می‌کند. سیگنال توسط مدولاتور بر روی حامل مدوله می‌شود و پس از تقویت در سطح مناسب در بخش فرستنده، به ماهواره ارسال می‌شود.

این سیگنال پس از رفت به ماهواره و برگشت از آن در گیرنده ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اولین وظیفه گیرنده، پس از دمدولاسیون فاز سیگنال دریافتی، قفل شدن بر روی کلاک فاصله‌سنجی است. پس از قفل شدن بر روی کلاک فاصله‌سنجی، گیرنده سیگنال فاصله‌سنجی شبه‌نوین را تولید و فاز آن را ثبت می‌کند. داده‌های فاز سیگنال دریافتی در تجهیز لینک پایین‌رو و بالارو به زیرسیستم فاصله‌سنجی ارسال می‌شود.

تأخیر سیگنال برگشتی از گرفتن همبستگی دو سیگنال ارسالی و دریافتی تولید می‌شود. حداکثر قدرت رفع ابهام فاصله یکطرفه ناشی از دوره تناوب دنباله فاصله‌سنجی در واحد متر از معادله (۶) به دست می‌آید.

شبه‌نوین برای فاصله‌سنجی مطابق استاندارد CCSDS وجود دارد. اولین کد با نام رأی‌گیری با وزن ۴ متعادل تاثرات نامیده می‌شود و به اختصار T4B نشان داده می‌شود. این کد دارای یک مؤلفه کلاک قوی‌تر است و با توجه به زمان دستیابی کمی بیشتر، صحت فاصله‌سنجی بیشتری را ارائه می‌دهد. بنابراین کد T4B باید برای سیستم‌های فاصله‌سنجی مانند رادیو علوم مورد استفاده قرار گیرد که در آن دقت فاصله‌سنجی پارامتر اصلی مورد توجه است. دیگر کد شبه‌نوین توصیه شده، رأی‌گیری با وزن ۲ متعادل تراثرات است که به اختصار T2B نشان داده می‌شود. این کد دارای مؤلفه کلاک ضعیف‌تری نسبت به سایر مؤلفه‌هاست و زمان دستیابی سریع‌تری را در ازای جیت‌ر در اندازه‌گیری در اختیار می‌گذارد. کد T2B باید برای سیستم‌های فاصله‌سنجی‌ای مورد استفاده قرار گیرد که زمان دستیابی مهم‌ترین مسئله است، به عنوان مثال در ماموریت‌هایی که سیگنال به نوین سیگنال فاصله‌سنجی مورد انتظار بسیار کم است.

ساختار هر دو کد T2B و T4B بر اساس ترکیب منطقی توالی‌های شش‌گانه معرفی شده در جدول (۱) است. هر مؤلفه دنباله در یک ثبات جابجا شونده دایره‌ای با طول برابر با طول خود مؤلفه قرار می‌گیرد و با نرخ تراشه کلاک می‌خورد. کد ترکیبی T4B از ترکیب خروجی‌های ثبات‌ها با استفاده از معادله (۳) و کد T2B با استفاده از معادله (۴) تشکیل شده است:

$$C = \text{sign}(4C_1 + C_2 - C_3 - C_4 + C_5 - C_6) \quad (2)$$

$$C = \text{sign}(2C_1 + C_2 - C_3 - C_4 + C_5 - C_6) \quad (3)$$

شبکه فضایی عمیق نیز در همین راستا با بررسی معیارهای مختلف دو نوع تابع منطقی برای تشکیل سیگنال فاصله‌سنجی شبه‌نوین پیشنهاد کرده است. در یکی فرض شده فاصله‌سنجی با سخت‌افزار فرستنده-گیرنده روی ماهواره بازسازی شونده باشد که این تابع در معادله (۴) آمده و معادله (۵) برای تابع تشکیل دهنده سیگنال با رله شفاف پیشنهاد شده است.

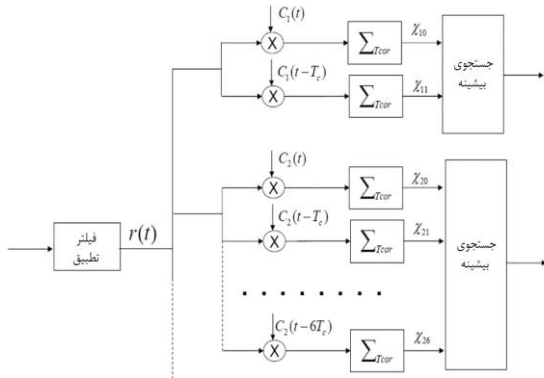
$$\text{Seq}(i) = C'_1(i) \cup [C'_2(i) \cup C'_3(i) \cup C'_4(i) \cup C'_5(i) \cup C'_6(i)] \quad (4)$$

$$\text{Seq}(i) = \begin{cases} 1, & C'_1(i) + C'_2(i) + C'_3(i) + C'_4(i) + C'_5(i) \geq 3 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

## طراحی و شبیه‌سازی

هدف این مقاله طراحی یک رله شفاف است که برای سامانه‌های فاصله‌سنجی مناسب باشد. رله‌های شفاف موضوع جدیدی نیستند اما بررسی عملکرد آن‌ها با کاربرد فاصله‌سنجی و بررسی اثر پارامترهای مختلف رله شفاف بر عملکرد چنین سامانه‌ای در کشور انجام نشده است. بنابراین باید اثرات پارامترهای مختلف رله بر کیفیت عملکرد سامانه‌های فاصله‌سنجی مورد بررسی قرار گیرد. سپس براساس نتایج

مقدور و منطقی است. در زیر سیستم محاسبه تأخیر مدل‌سازی شده در متلب از همین روش استفاده شد که در شکل (۶) آمده است.



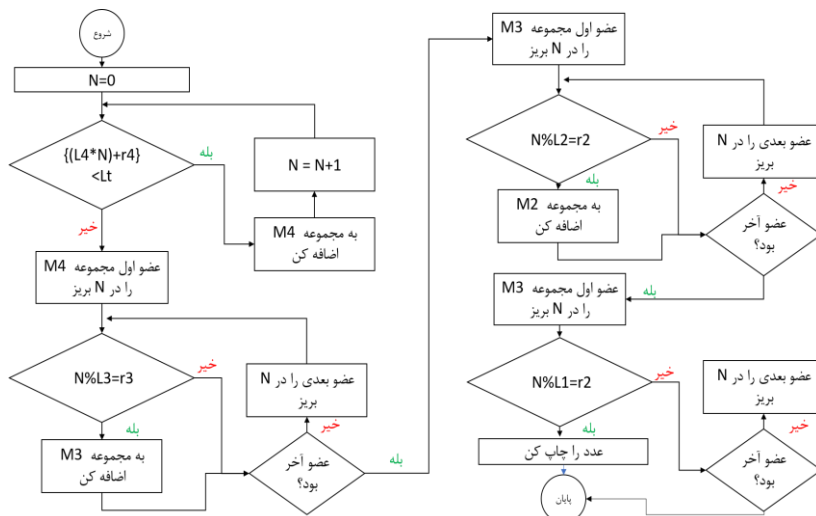
شکل ۶- معماری روش همبسته‌گیری کاملاً موازی [۱]

سپس به کمک قضیه مانده چینی مقدار نهایی شیف‌ت محاسبه می‌شود. برای حل قضیه مانده‌چینی یک تابع متلب بر اساس الگوریتم شکل (۷) نوشته شد که خروجی آن میزان تأخیر سیگنال را می‌دهد. فاز بعدی طراحی و پیاده‌سازی یک رله شفاف است که به عنوان یک محموله با کاربرد فاصله‌سنجی در ماهواره قابل استفاده باشد. بلوک دی‌گرام رله در شکل (۸) آورده شده است. پس از دریافت سیگنال فاصله‌سنجی در ماهواره، این سیگنال ابتدا فیلتر و تقویت شده و سپس یک پایین آورنده فرکانس سیگنال فاصله‌سنجی را به باند میانی تبدیل می‌کند. سیگنال باند میانی یک طبقه تقویت شده و مجدداً توسط یک بالا‌برنده روی فرکانس حامل لینک پایین‌رو مدوله می‌شود. سیگنال مدوله شده و به آنتن تغذیه می‌شود. شکل (۹) بلوک رله شفاف ماهواره شبیه‌سازی شده در متلب را نشان می‌دهد.

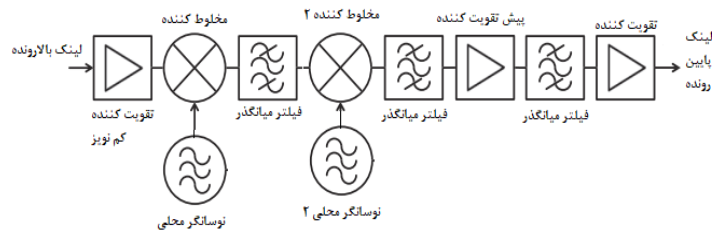
$$U = \frac{1}{2} c \cdot L \cdot T_c = \frac{c \cdot L}{4 f_{RC}} \quad (۶)$$

به عنوان مثال، با تعداد تراشه  $L = 1$  و  $470,009$ ،  $f_{RC} = 1MHz$  و  $U \approx 75,710,000$  در واحد متر یا حدود  $75,710$  کیلومتر است. زیرسیستم فاصله‌سنجی، فرستنده لینک بالارو و گیرنده لینک پایین‌رو سیگنال فاصله‌سنجی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی زیرسیستم فاصله‌سنجی، بخش محاسبه تأخیر، یک موازنه بین پیچیدگی و تعداد سخت‌افزار و زمان وجود دارد. دو معماری برای محاسبه تأخیر سیگنال فاصله‌سنجی از طریق محاسبه همبستگی وجود دارد که در یکی اولویت زمان دستیابی است و در دیگری کاهش حجم سخت‌افزار. در روش اول از تعداد زیادی همبسته‌گیر موازی استفاده می‌شود. به ازای هر مؤلفه سیگنال و تمام شیف‌ت‌های غیر تکراری آن یک همبسته‌گیر وجود دارد. سیگنال دریافتی به صورت موازی به همه همبسته‌گیرها تغذیه می‌شود و خروجی همبسته‌گیر بیشینه، هم فاز بودن آن مؤلفه با دنباله دریافتی را نشان می‌دهد و شیف‌ت مؤلفه مذکور مشخص می‌شود. در این روش زمان مورد نیاز برای پاسخ به اندازه محاسبه طولانی‌ترین همبستگی است یعنی به اندازه زمان همبستگی طولانی‌ترین مؤلفه.

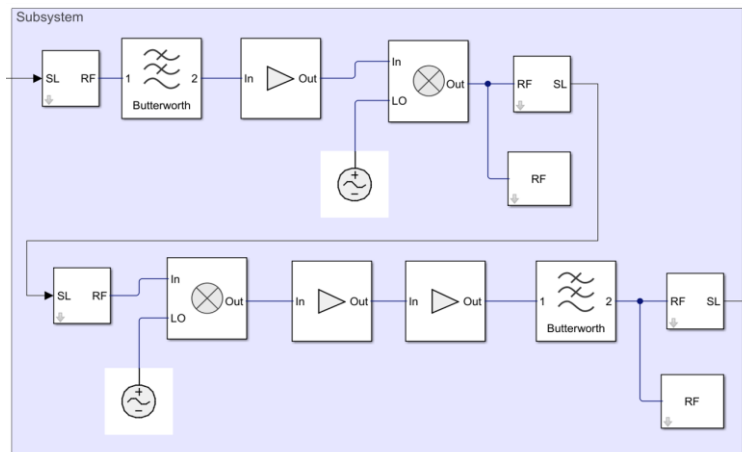
در روش دیگر برای هر مؤلفه یک همبسته‌گیر وجود دارد که هر بار همبستگی دنباله دریافتی را با یک شیف‌ت از مؤلفه محاسبه می‌کند و در انتها شیف‌تی که مقدار بیشینه همبستگی را دارد مشخص می‌شود. زمان لازم برای رسیدن به پاسخ در این روش برابر ضرب طول طولانی‌ترین مؤلفه در زمان یک بار همبستگی گرفتن آن دنباله است. روش دوم که روش نیمه‌موازی نام دارد معمولاً در جایی استفاده می‌شود که محدودیت سخت‌افزار و توان مصرفی وجود دارد مانند خود ماهواره. در ایستگاه زمینی استفاده از روش اول به نام تماماً موازی



شکل ۷- الگوریتم جستجو و الگ کردن حل قضیه مانده چینی



شکل ۸ - بلوک دیاگرام رله شفاف



شکل ۹ - بلوک دیاگرام سامانه رله شفاف ماهواره

بودن آن و به دست آوردن روند تغییرات خطا با کاهش سیگنال به نویز است. با توجه به ماهیت بازگشتی محاسبه فاصله از طریق روش شبه نویز بر مبنای استفاده از قضیه مانده چینی، محاسبه مستقیم فاصله معیار خوبی برای محاسبه خطا به نظر نمی آید. به همین جهت محاسبه مقدار خطا در تعیین همبسته‌گیرها به عنوان یک معیار مناسب برای ارزیابی خطا قابل استفاده می‌باشد. برای محاسبه خطای سامانه از معادله (۷) استفاده می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^N [ABS(r_i - r'_i) \times (\prod_{n \neq i} \lambda_n)] \quad (7)$$

در معادله (۷) برای خطای هر همبسته‌گیر یک وزن در نظر گرفته شده زیرا خطا در هر کرولیتور، با فرض ثابت و صحیح بودن بقیه کرولیتورها، موجب تغییر عدد نهایی تأخیر به اندازه ک.م.م طول سایر مؤلفه‌ها می‌شود. برای مثال در دنباله T2B، خطا در تشخیص اختلاف فاز سیگنال دریافتی و مؤلفه کلاک فاصله‌سنجی (C<sub>1</sub>) باعث جابجا شدن تأخیر به اندازه ۴۸۲۷۹۰ تراشه می‌شود (۲۲×۱۹×۱۵×۱۱×۷) در حالی که خطا در تشخیص اختلاف فاز سیگنال دریافتی و مؤلفه دوم (C<sub>2</sub>) باعث جابجا شدن مقدار تأخیر به اندازه ۱۳۷۹۴۰ تراشه می‌شود. بنابراین مشخص است که وزن خطا در تشخیص نادرست مقدار تأخیر هر مؤلفه یکسان نیست.

در این مقاله با توجه به رویکرد نهایی که پیاده‌سازی است، بهینه‌سازی از طریق روش‌های مرسوم تئوری انجام نشده است بلکه اثرات پارامترهای مختلف قطعات موجود در بازار روی عملکرد سامانه بررسی شده است. پارامترهای میکسر و اسپلاتور محلی که در جدول (۲) آمده با مقادیر واقعی جایگزین شد. در ایستگاه زمینی این موارد همگی ایده‌آل در نظر گرفته شد اما در مورد ماهواره نیاز است تا اثرات آنها بررسی و گزارش شود.

جدول ۲ - مقادیر ایده‌آل رله شفاف شبیه‌سازی شده

ردیف	پارامتر	مقدار ایده‌آل
۱	بهره میکسر (dB)	۰
۲	عدد نویز میکسر (dB)	۰
۳	OIP3 میکسر (dBm)	بی نهایت
۵	فرکانس نویز فاز نوسانگر محلی (Hz)	۰
۶	سطح نویز فاز نوسانگر محلی (dBc/Hz)	۰

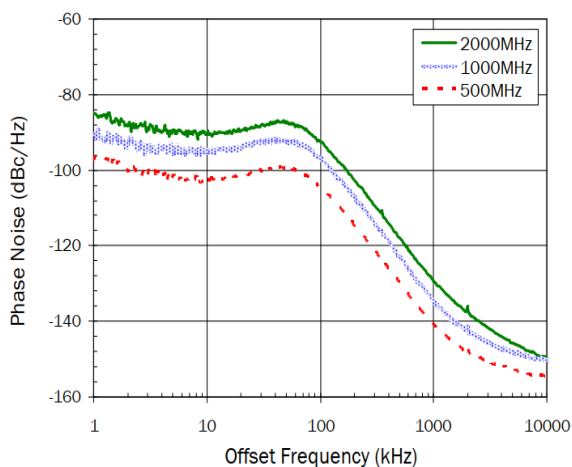
### اثر سیگنال به نویز

در این بخش به بررسی اثر کاهش سیگنال به نویز با فرض ایده‌آل بودن رله پرداخته شد. هدف اطمینان از عملکرد رله با فرض ایده‌آل

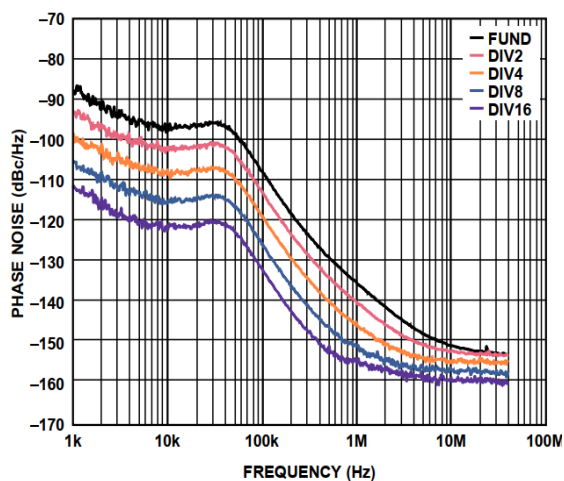


## اثر نویز فاز نوسانگر محلی

اثر بعدی اضافه شده به شبیه‌سازی، نویز فاز نوسانگر محلی بود. به همین منظور ابتدا نویز فاز دو قطعه انتخاب شده بررسی شد. میکسر RF2051 دارای نوسانگر محلی یکپارچه بود و نویز فاز آن مشخص بود. ADE-35MH+ نیاز به یک نوسانگر محلی خارجی داشت به همین جهت ADF4350 که یک تراشه نوسانگر محلی است، انتخاب شد. الگوی نویز فاز دو قطعه rf2051 و adf4350 که در شکل (۱۲) آورده شده به شبیه‌سازی اضافه شد.



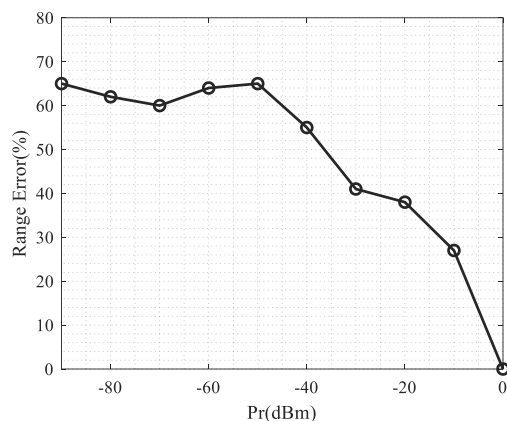
(الف)



(ب)

شکل ۱۲- (الف) الگوی نویز فاز RF2051 و (ب) ADF4350 [۲۸، ۲۹]

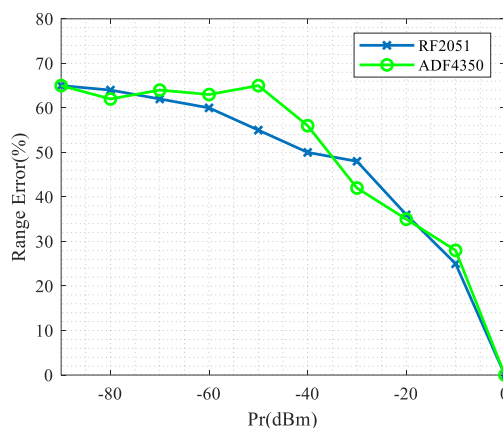
شکل مقایسه بین اثرات نویز فاز دو قطعه RF2051 و ADF4350 بر میزان خطای سامانه بر حسب سیگنال به نویز دریافتی در گیرنده ایستگاه زمینی است.



شکل ۱۰- درصد خطای سامانه بر اساس توان دریافتی گیرنده

شکل (۱۰) اثر کاهش سیگنال به نویز در گیرنده را با یک رله ایده‌آل نشان می‌دهد. بدیهی است با کاهش سیگنال به نویز در گیرنده دنباله آشکار شده خطای بیشتری دارد و خطای فاصله‌سنجی افزایش می‌یابد. با توجه به تصادفی بودن ماهیت نویز، برای تحلیل بهتر از میانگین خطا استفاده شد و در هر سیگنال به نویز، ۱۰ بار مقدار خطا اندازه‌گیری و میانگین گرفته شد. این کار در تمام شبیه‌سازی‌های بعدی نیز تکرار شد.

برای شبیه‌سازی با مقادیر واقعی، قطعات موجود برای میکسر و نوسانگر محلی بررسی شد و دو میکسر RF2051 و ADE-35MH+ برای آزمون انتخاب شدند. در گام اول تنها اثرات میکسر مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۱) با غیرایده‌آل در نظر گرفتن سامانه رله از جایگزینی مقادیر ایده‌آل با مقادیر جدول (۳) به دست آمد.



شکل ۱۱- اثر مقادیر غیر ایده‌آل میکسر بر خطای سامانه

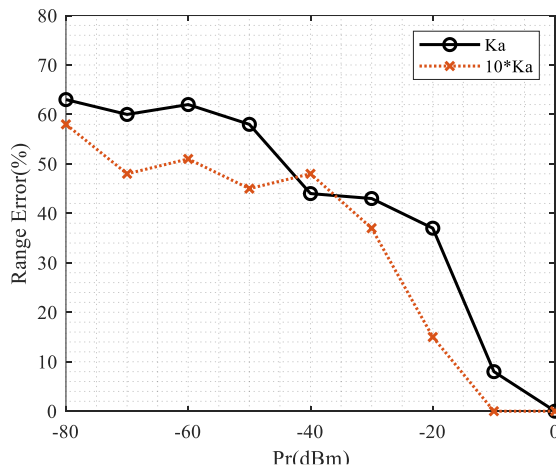
جدول ۳- مقادیر غیر ایده‌آل رله شفاف شبیه‌سازی شده [۲۷، ۲۸]

ردیف	پارامتر	RF2051	ADE-35MH+
۱	بهره میکسر (dB)	-۲	-۷
۲	عدد نویز میکسر (dB)	۱۲	ندارد (غیرفعال است)
۳	OIP3 میکسر (dBm)	بی‌نهایت	۱۸

جدول ۳- اثرات ضریب کلاک بر زمان دستیابی [۱]

نوع دنباله	طول همبسته گیر (تراشه)	زمان دستیابی (ثانیه)
T2B	۹۳۱۳۰۰	۳۰/۷
T4B	۱۵۲۷۰۰۰	۵۰۹

بنابراین نتایج شکل (۱۴) می‌تواند از آن رو باشد که در طول تمام آزمایش‌ها، زمان همبسته‌گیری ثابت بوده و احتمال خطای آن افزایش یافته است. در آزمایش بعدی اثر افزایش طول همبسته‌گیری بر حسب تراشه ( $K_a$ ) با سیگنال فاصله‌سنجی T4B سنجیده شده است. افزایش ۱۰ برابری این طول نقطه آغاز خطای سامانه را ۱۰ dB کاهش داده است. شکل (۱۵) این را به خوبی نشان می‌دهد.



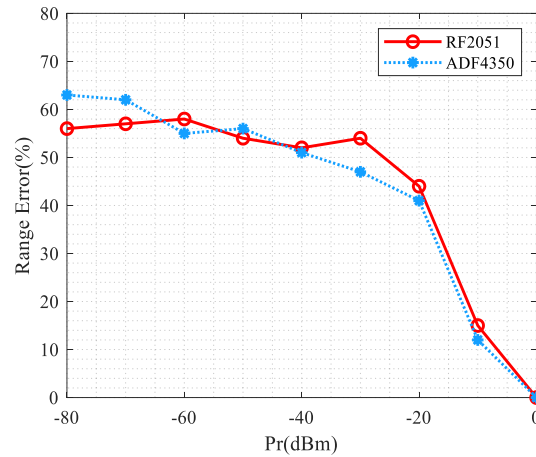
شکل ۱۵- خطای سامانه فاصله‌سنجی در اثر طول کرویشن

### پیاده‌سازی، تست و تأیید عملکرد

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی طراحی انجام شده، پیاده‌سازی رله شفاف ماهواره با کمک بررسی‌های بخش‌های قبل و مطابق با جدول (۴) انجام شده است. مدل تجمیع شده سامانه به همراه آنتن‌ها و سایر بخش‌های مورد نیاز در شکل (۱۷) آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی رله شفاف

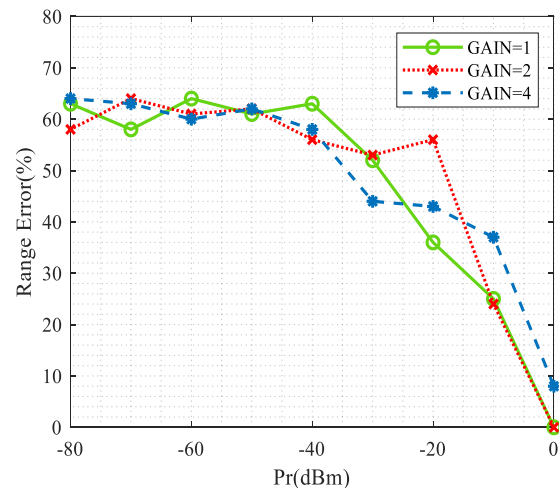
ردیف	مشخصه	مقدار
۱	باند فرکانسی	باند L
۲	پهنای باند هر کانال	2 MHz
۳	تعداد کانال	۵
۲	بهره	40 dB
۳	عدد نویز	1 dB
۵	توان مصرفی	6W



شکل ۱۳- خطای سامانه فاصله‌سنجی در اثر نویز فاز

### بررسی اثرات ضریب ساعت فاصله‌سنجی

برای اطمینان از عملکرد رله با سیگنال‌های فاصله‌سنجی شبیه نویز مختلف، سه سیگنال فاصله‌سنجی شبیه‌سازی شد، دو سیگنال T4B و T2B استاندارد CCSDS و یک سیگنال DSN که برای رله شفاف توصیه شده است. تفاوت این سه در ضریب مؤلفه کلاک فاصله‌سنجی است. ضریب مؤلفه کلاک در این سیگنال‌ها به ترتیب ۲، ۴ و ۱ است. در شکل (۱۴) مشخص است که خطای هر سه سیگنال در یک بازه به اشباع می‌رسد اما مقدار خطای T4B در سایر نقاط بیشتر است.



شکل ۱۴- خطای سامانه فاصله‌سنجی در اثر ضریب کلاک

در [۱] نشان داده شده است که افزایش ضریب مؤلفه کلاک موجب افزایش احتمال خطا با همبسته‌گیری در زمان و سیگنال به نویز ثابت می‌شود. جدول (۳) نشان می‌دهد برای یک مقدار ثابت از احتمال خطا و سیگنال به نویز، باید زمان همبسته‌گیری افزایش یابد. در ردیف سوم زمان دستیابی بر حسب ثانیه با فرض فرکانس کلاک 2 Mc/s آورده شده است.



شکل ۱۷- ترکیب تست توان خروجی با کیف تست سامانه رله

### نتیجه گیری

طراحی یک رله مخابراتی با شبیه‌سازی‌های انجام شده با بررسی اثرات غیرخطی میکسر، نویز فاز نوسانگر محلی و عدد نویز سامانه برای کاربرد فاصله‌سنجی تأیید شد. در این بررسی استانداردهای CCSDS و DSN معیار قرار داده شد. براساس بررسی پارامترهای انجام شده، طرح بهینه پیاده‌سازی و ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری انجام شده نشانگر صحت عملکرد رله می‌باشد. در اندازه‌گیری انجام شده، تأثیر سامانه رله در عملکرد یک لینک رادیویی به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که افزودن سامانه رله بهینه طراحی شده، اثر منفی بر روی عملکرد لینک رادیویی ندارد.

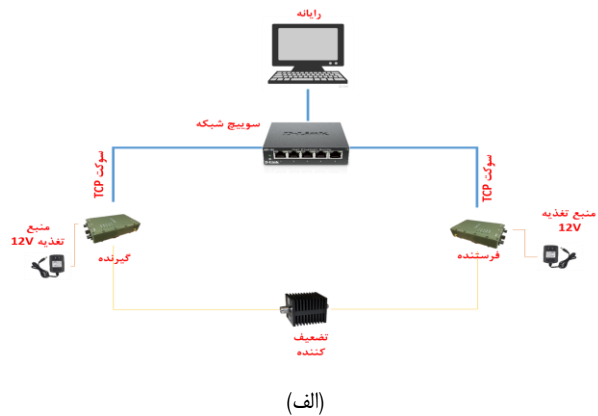
### تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

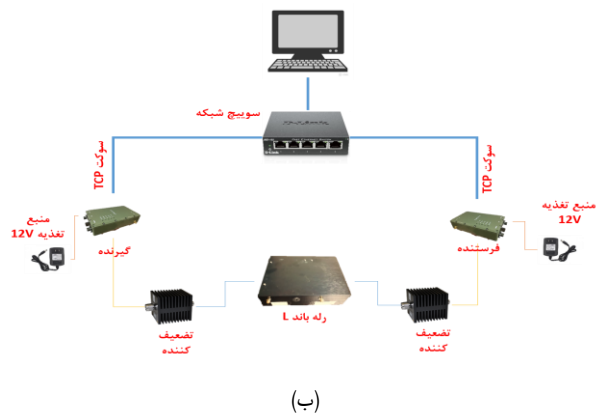
### مراجع

- [1] CCSDS "PSEUDO-NOISE (PN) Ranging Systems, CCSDS 414.0-G-2", 2014 .
- [2] Report Concerning Space Data System Standards, "DATA transmission and pn ranging for 2 ghz cdma link via data relay satellite", Green Book, Washington DC, USA, 2013.
- [3] F.Winterstein, "Simultaneous transmission of GMSK telemetry and PN ranging: Measurement report in support of the draft CCSDS recommendations 401 (2.4. 22A) and 401 (2.4. 22B)." In CCSDS Radio Freq. Modulation Workshop Group Meeting. 2014.
- [4] P. Kinman, *Pseudo-Noise and Regenerative Ranging*, DSN Telecommunications Link Design Handbook, DSN,810-005 2004 .
- [5] A. O'Dea and P Kinman , *quential Ranging*, DSN, 2019 .

برای بررسی عملکرد این رله نیاز به یک سامانه فاصله‌سنجی است تا بتوان مقدار دقیق فاصله را اندازه گرفت. با توجه به در دسترس نبودن یک سامانه یا تجهیز مرجع برای مقایسه و ارزیابی مقدار افزایش یا کاهش خطا، تأثیر عملکرد رله بر مقدار نرخ خطای بی‌ی در یک گیرنده دیجیتال به عنوان شاخص در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، در حالت ایده‌آل، عملکرد سامانه رله نباید منجر به افت عملکرد گیرنده رادیویی (افزایش نرخ خطا در مرز حساسیت گیرنده) گردد. به این منظور، از یک لینک فرستنده و گیرنده داده موجود با مدلاسین GMSK و قابلیت ارسال نرخ داده حداکثر 1Mb/s استفاده شده است. نرخ خطای بی‌ی و مرز حساسیت این لینک رادیویی به عنوان تجهیز مرجع، بدون سامانه رله ساخته شده با پیکره‌بندی نشان داده شده در شکل (۱۶-الف) اندازه‌گیری شده است. سپس مانند شکل (۱۶-ب) سامانه رله که برای راحتی انجام تست در یک کیف به همراه باتری و مدار شارژ جانمایی شده است، در مسیر لینک قرار گرفته و مقادیر ذکر شده مجدد اندازه‌گیری شده است. در شکل (۱۷)، پیکره‌بندی تست با سخت‌افزاری آماده شده نیز نشان داده شده است. تغییر نکردن مقدار نرخ خطای بی‌ی و مرز حساسیت به عنوان عملکرد خوب رله در نظر گرفته شد. نرخ خطای بی‌ی در هر دو حالت بهتر از  $10^{-5}$  در توان ورودی کمتر از  $-91$  dBm می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- مجموعه اندازه‌گیری حساسیت (الف) بدون سامانه رله (ب) با سامانه رله

- [18] M. Visentin and M. Mondin, "Performance-based evaluation of selected PN ranging codes for on-board regeneration," *ESAIESOC Contract 18689/04/D/CS*, 2005.
- [19] G. Boscagli, P. Holsters, E. Vassallo, and M. Visintin, "PN regenerative ranging and its compatibility with telecommand and telemetry signals," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 11, pp. 2224-2234, 2007.
- [20] F. De Tiberis, "X/X/Ka deep space transponder for Mercury: Design & Test," in *the 4th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Darmstadt, Germany*, Sep. 2007.
- [21] M. C. Comparini, F. De. Tiberis, R. Novello, and et al., "Deep Space Transponder Technology Evolution: From Mars Express to Bepicolombo Missions," *IEEE Proceedings Special Issue on Deep Space Communications*, 2007.
- [22] P. Holsters, G. Boscagli, and E. Vassallo, "Pseudo-Noise Ranging for Future Transparent and Regenerative Channels," In *SpaceOps 2008 Conference*, P.3277, 2008.
- [23] M. Easterling, "A Long-Range Precision Ranging System," in *Joint Meeting of International Scientific Radio Union and National Committee and Institute of Radio Engineers*, no. JPL-TR-32-80, 1961.
- [24] R. C. Titsworth, "Optimal ranging codes," *IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, vol. 10, no. 1, pp. 19-30, 1964.
- [25] S. Bryant, "Using digital signal processor technology to simplify deep space ranging," in *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH85)*, vol. 3, pp. 3-1277, IEEE, 2001.
- [26] J.B. Berner, and S.H. Bryant, "New tracking implementation in the Deep Space Network," 2001.
- [27] *RF2051*. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/RF2051>.
- [28] *ADE-35MH+*. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ADE-35MH%2B>.
- [29] *ADF4350*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/adf4350.html>.
- [6] D. Arnold, O. Montenbruck, S. Hackel, and K. Sošnica, "Satellite laser ranging to low Earth orbiters: orbit and network validation," *Journal of geodesy*, vol. 93, no. 11, pp. 2315-2334 2019.
- [7] J. J. Degnan, "Satellite laser ranging: current status and future prospects," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, no. 4, pp. 398-413, 1985.
- [8] M. Wilkinson, U. Schreiber, I. Procházka, et al., "The next generation of satellite laser ranging systems," *Journal of Geodesy*, vol. 93, no. 11, pp. 2227-2247, 2019.
- [9] X. Xiaoyi, W. Chunhui, and J. Zhonghe, "Design, analysis and optimization of random access inter-satellite ranging system," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 871-883, 2020.
- [10] J. B. Berner, S. H. Bryant, and P. W. Kinman, "Range Measurement as Practiced in the Deep Space Network," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 11, pp. 2202-2214, 2007. doi: 10.1109/jproc.2007.905128.
- [11] Y. Meng, W. Lei, L. Bian, Y. Wang, T. Yan, and G. Wang, "One-way deep space navigation with radiometric and inertial data fusion," in *2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, pp. 1-5, IEEE, 2017.
- [12] M. M. Rybak, P. Axelrad, J. Seubert, and T. Ely, "Chip Scale Atomic Clock-Driven One-Way Radiometric Tracking for Low-Earth-Orbit CubeSat Navigation," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 58, no. 1, pp. 200-209, 2021.
- [13] C.L. Thornton, and J. Border. *Radiometric tracking techniques for deep-space navigation*. John Wiley & Sons, 2003.
- [14] C.C. Girardey, "ESA Tracking Systems," *International Telemetry Conference Proceedings*, 1992.
- [15] J. B. Berner. and S. H. Bryant, "Operations comparison of deep space ranging types: Sequential tone vs. pseudo-noise," In *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, vol. 3, pp. 3-3. IEEE, 2002.
- [16] J. L. Massey, "Study on PN ranging codes for future missions," *JLM Consulting, Copenhagen, Denmark*, 2004.
- [17] J. L. Massey, G. Boscagli, and E. Vassallo, "Regenerative pseudo- noise- like (PNL) ranging sequences for deep- space missions," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 25, no. 3, pp. 305-322, 2007.