

تحلیل خطای زاویه در رادارهای مونوپالس باند S با آنتن مارپیچی حفره‌ای برای سامانه‌های جستجوگر پسیو

مرتضی محمدی شیرکلایی^{۱*}، امیر حسین دهقانی^۲

۱. استادیار، مهندسی برق مخابرات، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری مهندسی برق مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت:

۱۶ شهریور ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴ مهر ماه ۱۴۰۴

چکیده

با توجه به عملکرد اندازه‌گیری زاویه با دقت بالا، تکنیک مونوپالس نقش کلیدی در زمینه‌هایی مانند سنجش از دور و نظارت فضایی ایفا می‌کند. دقت اندازه‌گیری زاویه مونوپالس به اطلاعات دامنه و فاز دریافتی بستگی دارد. در این مقاله به بررسی طراحی سیستم مونوپالس دامنه برای استفاده در یک سامانه جستجوگر پسیو در باند S با خطای زاویه کمتر از ۲.۲ درجه و اسکن زاویه ۲۰- تا ۲۰+ درجه پرداخته می‌شود. در طرح پیشنهادی از چهار آنتن مارپیچی حفره‌ای با پلاریزاسیون دایروی راستگرد استفاده شده است که گین هر یک تقریباً برابر با ۲.۹ dB و گین مجموع ۷ dB می‌باشد. با استفاده از مشخصات آنتن آرایه شده و روابط رادار مونوپالس، خطای زاویه برای سیگنال به نویز dB20 برابر ۲.۲ درجه شده است.

واژه‌های کلیدی: مونوپالس، خطای زاویه، آنتن مارپیچی حفره‌ای، نسبت سیگنال به نویز.

Angle Error Analysis in S-Band Monopulse Radars with Cavity Vack Spiral Antenna for Passive Seeker Systems

Morteza Mohammadi Shirkolaei^{1*}, Amir Hossein Dehghani²

1. Assistance Prof, Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran.

2. Ph D student, Department of Electrical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Due to its high-precision angle measurement performance, monopulse technique plays a key role in fields such as remote sensing and space surveillance. The accuracy of monopulse angle measurement depends on the received amplitude and phase information. This paper studies the design of a monopulse amplitude system for use in an S-band passive seeker system with an angle error of less than 2.2 degrees and an angle scan of -20 degrees to +20 degrees. The proposed design uses four helical cavity antennas with right-handed circular polarization, each with a gain of approximately 2.9 dB and a total gain of 7 dB. Using the characteristics of the arrayed antenna and the monopulse radar relations, the angle error for the signal-to-noise ratio of 20 dB is 2.2 degrees.

Key words: Monopulse, Angle error, Cavity back spiral antenna, Signal to noise ratio.

دریافتی از آن می‌توان زاویه هدف را با دقت بالا بدست آورد. اگر دو سیگنال دریافتی در پردازش دارای دامنه یکسان و اختلاف فاز باشند به آن مونوپالس فاز گفته می‌شود و اگر دو سیگنال دریافتی دارای اختلاف دامنه باشند سیستم از نوع مونوپالس دامنه است [۱-۵]. یکی از آنتن‌های که در رادارهای مونوپالس استفاده می‌شود، آنتن مارپیچی حفره‌ای^۱ می‌باشد. آنتن‌های مارپیچی یک مدل از آنتن‌های مستقل از فرکانس به حساب می‌آیند. اخیراً از این نوع آنتن‌ها به دلیل پهنای باند زیاد در حوزه‌های تجاری و نظامی مختلف بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی دیگر آنتن‌های مارپیچی ساختاری ساده، کم حجم و کم هزینه بودن این نوع از آنتن‌ها است. این نوع از آنتن‌ها دارای

۱- مقدمه

رادار یک دستگاه رادیویی است که برای مشاهده اجسام و اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های آن‌ها به وسیله امواج الکترومغناطیسی به کار می‌رود. رادارها با توجه به نوع استفاده و محل قرارگیری دارای انواع مختلفی هستند. در رادارهای متداول، توانایی کشف زاویه هدف با دقت بالا وجود ندارد. برای حل این مشکل مهندسان به سمت استفاده از تکنیک مونوپالس در رادار رفتند که توانایی کشف زاویه هدف با دقت بالا دارد. استفاده از تکنیک مونوپالس بر پایه اختلاف فاز و دامنه بین دو سیگنال دریافتی از هدف می‌باشد. برای این کار حداقل از دو آنتن استفاده می‌شود و با توجه به شکل پترن هر آنتن و سیگنال

¹ Cavit back spiral antenna

کل مسیر ثابت و فاصله بین بازوها در تمام طول مسیر بدون تغییر باقی می ماند. در هر فرکانس، ناحیه فعال در تشعشع آنتن ماریپیچی، ناحیه ای است که محیط آن برابر یک طول موج شود. پس، معادله بازوی آنتن ارشمیدسی دوبازویی را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

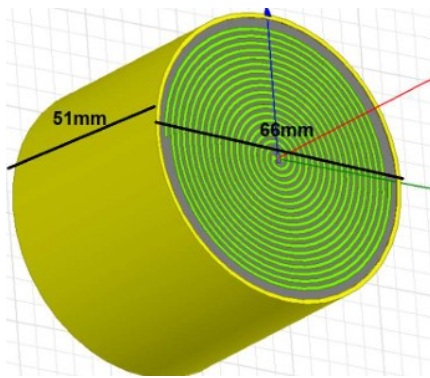
$$r = r_0 \theta + r_1 \quad (9)$$

$$\frac{c}{f_{low}} = 2\pi r_2 \quad (10)$$

$$\frac{c}{f_{high}} = 2\pi r_1 \quad (11)$$

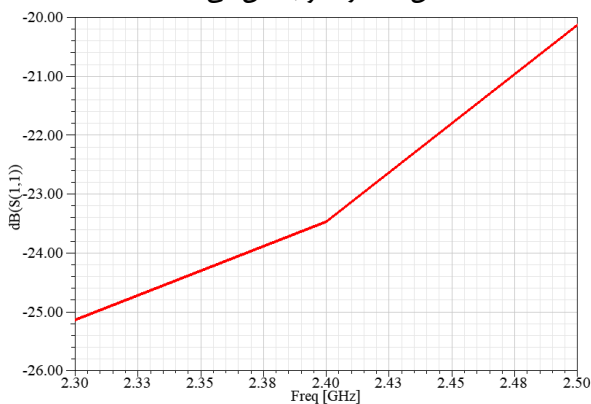
که r_1 و r_2 شعاع داخلی و خارجی بازوهای آنتن می باشد.

آنتن ماریپیچی در نرم افزار HFSS شبیه سازی شده است. در آنتن ماریپیچی طراحی شده (شکل ۱) مدل شبیه سازی دارای بازوهایی به عرض ۰.۸ میلی متر و شعاع ۳۳.۱ میلی متر می باشد. فاصله بین هر بازو ۰.۴ میلی متر است. صفحه آنتن از نوع راجرز ۴۰۰۳ با ضریب گذردهی ۵۵۳.۲ انتخاب شده است.



شکل ۱ - آنتن ماریپیچی طراحی شده

برای کاهش تاثیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر خط انتقال که باعث کاهش عملکرد بالن مایکرواستریپ می شود از جاذب دور محفظه فلزی استفاده شده است. شکل ۲ تلفات بازگشتی^۱ آنتن شبیه سازی شده را نشان می دهد. همان طور که مشخص است آنتن در محدوده فرکانسی مشخص شده دارای تلفات برگشتی کمتر از -20dB است که نشان عملکرد خوب آنتن می دهد.



شکل ۲ - تلفات برگشتی آنتن طراحی شده

پلاریزاسیون دایروی (راستگرد و چپگرد) هستند. این نوع از آنتن های توانایی بیشتری در دریافت و ارسال سیگنال نسبت به آنتن های خطی دارند [۶-۹]. آنتن ماریپیچی به دلیل دارا بودن مرکز فاز ثابت در پهنای باند زیاد یکی از پرکارترین آنتن رادارهای مونوپالس می باشد.

در بخش دوم این مقاله به روابط حاکم بر رادار مونوپالس پرداخته و در بخش سوم یک آنتن ماریپیچی حفره ای در باند S طراحی می شود. در بخش چهارم با توجه به فاصله آنتن ها از یکدیگر خطای زاویه را بر حسب SNR بدست می آوریم. در نهایت نتایج این مقلله ارائه خواهد شد.

۲- روابط مونوپالس

در طراحی سیستم مونوپالس از دو آنتن با پترن یکسان و مرکز فازهای متفاوت استفاده می شود. در این روش از یک مقایسه گر برای ایجاد دو سیگنال s و d استفاده می شود. برای محاسبه شیب مونوپالس در این حالت فرض می شود که فاصله مرکز فاز دو آنتن از یکدیگر برابر با l باشد. با فرض اینکه v_1 و v_2 به ترتیب سیگنال دریافتی از آنتن ۱ و ۲ باشد [۱۰-۱۳].

$$v_1 = 1, \quad v_2 = e^{jklsin(\theta)} \quad (1)$$

پترن تفاضل از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$d = v_1 - v_2 = 1 - e^{jklsin(\theta)} \\ = e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \left(e^{-\frac{jklsin(\theta)}{2}} - e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \right) \quad (2)$$

$$d = -j2\sin\left(\frac{klsin(\theta)}{2}\right) e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \quad (3)$$

پترن مجموع نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$s = v_1 + v_2 = 1 + e^{jklsin(\theta)} \\ = e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \left(e^{-\frac{jklsin(\theta)}{2}} + e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \right) \quad (4)$$

$$s = 2\cos\left(\frac{klsin(\theta)}{2}\right) e^{\frac{jklsin(\theta)}{2}} \quad (5)$$

در نتیجه نسبت d/s برابر است با:

$$\frac{d}{s} = \tan\left(\frac{klsin(\theta)}{2}\right) \quad (6)$$

برای $x \ll 1$ خواهیم داشت:

$$\sin(x) = \tan(x) = x \\ \rightarrow d/s = \tan(kl\theta/2) = kl/2\theta \quad (7)$$

در نتیجه

$$\frac{d}{s} = k_r \theta, \quad k_r = \frac{kl}{2} = \frac{l}{\lambda} \pi \quad (8)$$

در معادله فوق θ بر حسب رادیان است و k_r شیب مونوپالس است. اگر بخواهیم زاویه هدف را بر حسب درجه بیان کنیم باید شیب مونوپالس را در $\frac{\pi}{180}$ ضرب کنیم.

۳- آنتن ماریپیچی حفره ای

آنتن طراحی شده از نوع آنتن ماریپیچی با فاصله برابر یا ارشمیدسی است. آنتن ماریپیچی طراحی شده دو بازوی است که عرض بازوها در

¹ Return loss

$$\frac{l}{\lambda}(\sin(\theta_{max}) - \sin(\theta_{amb})) = n \rightarrow$$

$$l/\lambda = n/(\sin(\theta_{max}) - \sin(\theta_{amb})) \quad (13)$$

برای پیدا کردن اولین ابهام در زاویه باید کمترین مقدار ممکن را برای معادله بالا پیدا کرد. کمترین مقدار ممکن برای معادله بالا زمانی رخ دهد که $n = 1$ و $\theta_{amb} = -90$ باشد. در این صورت برای جلوگیری از رخ دادن ابهام باید فاصله آنتن از یکدیگر بصورت زیر باشد.

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{1}{1 + \sin(\theta_{max})} \quad (14)$$

در صورتی که زاویه دید سیستم حداکثر ۲۰ درجه در نظر گرفته شود با توجه به رابطه بالا فاصله دو آنتن از یکدیگر باید کمتر از ۰.۷۴ طول موج باشد. علاوه بر این باید به این موضوع توجه کرد که در هنگام پردازش سیگنال S پهنای باند 3dB سیستم حداقل بین منفی ۲۰ درجه تا مثبت ۲۰ درجه باشد. برای بررسی این موضوع باید به این نکته توجه کرد که بهره سیگنال S در زاویه صفر درجه به دلیل هم فاز بودن دو سیگنال 3dB افزایش می‌یابد. اما در زوایای دیگر به دلیل هم فاز نبودن دو سیگنال کمتر از 3dB افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه (شکل ۳) اختلاف بهره آنتن واحد در زاویه ۰ درجه و ۲۰ درجه برابر با 0.55 dB است باید اختلاف بهره سیگنال S در دو زاویه ۲۰ و ۰ درجه برابر با 2.45 dB باشد. با توجه به رابطه ۵ داریم:

$$s = 2 \cos\left(\frac{k l \sin(\theta)}{2}\right) e^{\frac{j k l \sin(\theta)}{2}} \rightarrow$$

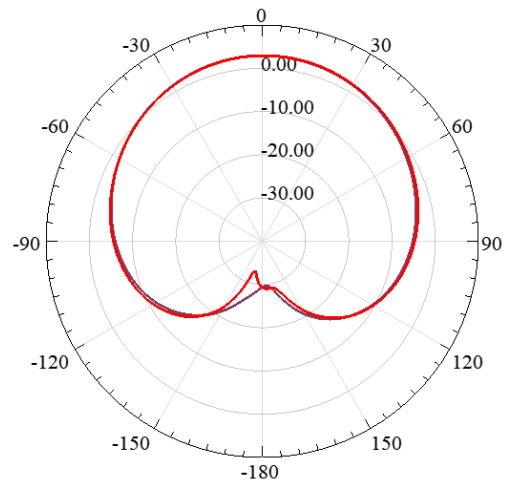
$$\frac{s(\theta)}{s(\theta=0)} = \cos\left(\frac{k l \sin(\theta)}{2}\right) \quad (15)$$

$$\text{for } \theta = 20: \frac{s(\theta=20)}{s(\theta=0)} = \cos\left(\frac{k l \sin(20)}{2}\right)$$

$$= -2.45 \text{ dB} \rightarrow l = 0.66\lambda$$

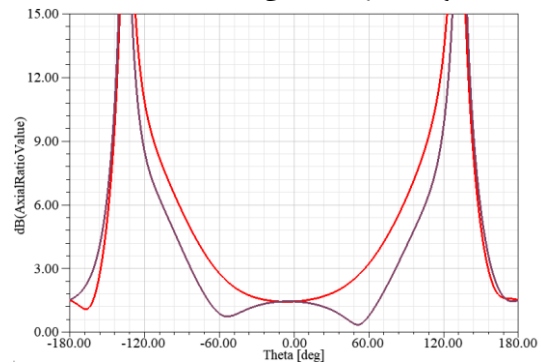
با توجه به نکات گفته شده برای جلوگیری از ابهام در زاویه و دستیابی به پهنای باند مطلوب می‌توان فاصله بین دو آنتن را ۰.۶۶ طول موج در نظر گرفت. در صورتی که فاصله بین دو آنتن ۰.۶۶ طول موج باشد سطح گلبرگ کناری از 14 dB بالاتر است که مقدار مطلوبی نیست. برای کاهش سطح گلبرگ کناری باید فاصله بین دو آنتن را کاهش دهیم. با کاهش فاصله بین دو آنتن به ۰.۶ طول موج سطح گلبرگ کناری کمتر از 14 dB می‌شود که عدد مطلوبی است. شکل ۶ پترن سیگنال مجموع S را نشان می‌دهد که ۴ آنتن در یک فضای ۲ بعدی با فاصله ۰.۶ طول موج (۷۵ میلی متر) از یکدیگر قرار دارند. با توجه به این شکل می‌توان گفت بهره آنتن 8.9Db است که بسیار مناسب است. همچنین پهنای باند آنتن ۴۴ درجه (از منفی ۲۲ درجه تا مثبت ۲۲ درجه) است و سطح گلبرگ کناری 17.2Db است.

در شکل ۳ الگوی تشعشعی راستگرد آنتن در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز نشان داده شده است که دارای گین 2.92dB و پهنای باند نصف توان^۱ برابر ۱۲۸ درجه می‌باشد.



شکل ۳ – الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز

شکل ۴ نسبت محوری آنتن طراحی شده را در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز بر حسب زاویه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نسبت محوری کمتر از 3dB می‌باشد.



شکل ۴ – نسبت محوری آنتن در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز

۳-۱-۱- آنتن آرایه‌ای ۲*۲

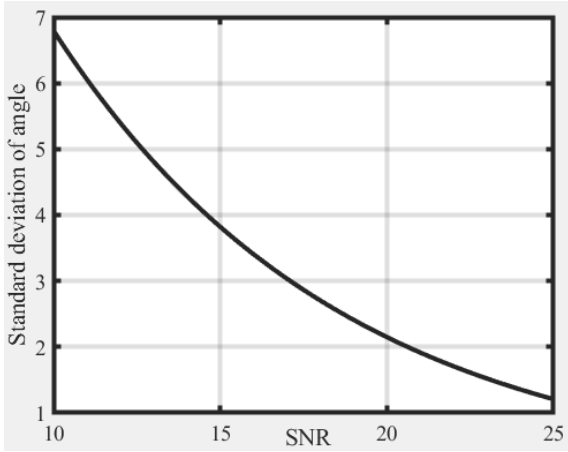
بعد از طراحی آنتن مارپیچی حفره‌ای، جهت طراحی سیستم مونوپالس باید این آنتن را بصورت ۲*۲ آرایه کرد تا زاویه سمت و ارتفاع هدف قابل محاسبه باشد (شکل ۵). در این قسمت به بررسی ابهام در زاویه پرداخته می‌شود. همانطور که در رابطه ۸ گفته شد نسبت $\frac{d}{s}$ برابر با $\tan\left(\frac{k l \sin(\theta)}{2}\right)$ است. همچنین می‌توان به جای $\tan\left(\frac{k l \sin(\theta)}{2}\right)$ از $\tan\left(\frac{k l \sin(\theta) + 2n\pi}{2}\right)$ استفاده کرد. برای بررسی وجود ابهام در سیستم یک بار از θ_{max} و بار دیگر از θ_{amb} در رابطه بالا استفاده می‌شود که θ_{max} نشان دهنده بیشینه زاویه دید سیستم و θ_{amb} نشان دهنده زاویه ابهام است. در این صورت خواهیم داشت:

$$k l \sin(\theta_{amb}) + 2n\pi = k l \sin(\theta_{max}) \rightarrow$$

$$\frac{l}{\lambda} \sin(\theta_{amb}) + n = \frac{l}{\lambda} \sin(\theta_{max}) \quad (12)$$

¹ Half Power Beam Width

البته در صورتی که به جای استفاده از ۴ آنتن از ۴ مجموعه subarray استفاده کنیم با افزایش گین می توان به SNR بهتری دست یافت. همچنین در این حالت با افزایش فاصله مرکز ۴ مجموعه subarray نسبت به یکدیگر شیب مونوپالس نیز افزایش پیدا می کند. در نهایت می توان گفت با استفاده از تعداد آنتن بیشتر می توان به انحراف معیار زاویه کمتری دست یافت.



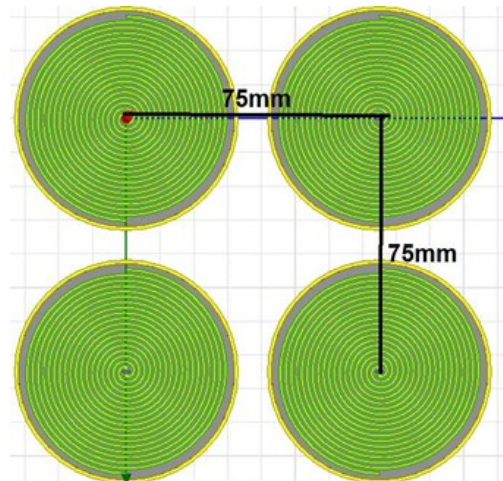
شکل ۷ - نمودار انحراف معیار خطای زاویه بر حسب SNR

۴- نتیجه گیری و بحث

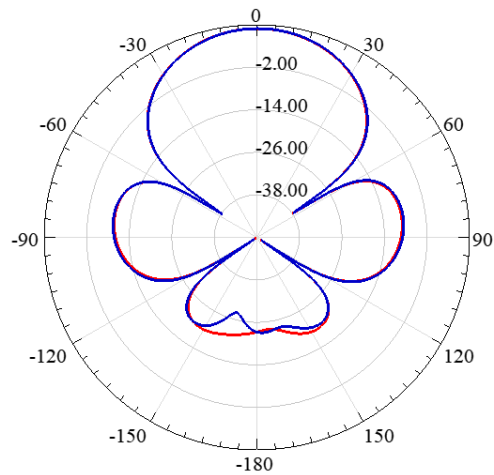
در این مقاله به بررسی طراحی سیستم مونوپالس برای استفاده در یک سامانه جستجوگر پسپو در باند S با خطای زاویه کمتر از ۲.۲ درجه و اسکن زاویه ۲۰- تا ۲۰+ درجه پرداخته شد. در طرح پیشنهادی از چهار آنتن مارپیچی حفره‌ای با پلاریزاسیون دایروی راستگرد استفاده شده است که گین هر یک تقریباً برابر با ۲.۹dB و گین مجموع ۷dB می باشد. با استفاده از مشخصات آنتن آرایه شده و روابط رادار مونوپالس، خطای زاویه بر حسب سیگنال به نویز ۲۰dB برابر ۲.۲ درجه شده است.

۵- مراجع

- [1] K. Han and S. Hong, "MIMO Monopulse Radar for Detecting Human Targets With I/Q Curve-Length Estimations," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 32, no. 3, pp. 214-217, March 2022, doi: 10.1109/LMWC.2022.3142322.
- [2] C. Lee, K. -H. Shin, J. -H. Lee, H. -W. Lee, J. -W. Kim and J. -W. Yu, "FMCW Monopulse Radar with an Orthogonally Polarized Dual-Beam Dielectric Resonator Antenna," 2024 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Incheon, Korea, Republic of, 2024, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISAP62502.2024.10846511.
- [3] J. Ma, D. Lu, J. Liu and L. Shi, "A Cross-Eye Jamming Mitigation Approach for Polarized Monopulse Radars," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 61, no. 2, pp. 5495-5498, April 2025, doi: 10.1109/TAES.2024.3468294.
- [4] H. Yang, S. Jiang and Q. Cheng, "Research on Jamming Modulation Technology of Monopulse Radar Sidelobe Canceller," 2022 4th International Conference on Applied



شکل ۵ - آنتن آرایه مارپیچی حفره‌ای ۲*۲ (دید از روبرو)



شکل ۶ - پترن سیگنال مجموع آنتن آرایه‌ای ۲*۲ در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز

۳-۲- شیب مونوپالس و انحراف معیار خطای زاویه

در این قسمت به محاسبه شیب مونوپالس و انحراف معیار خطای زاویه بر حسب نسبت سیگنال به نویز پرداخته می شود. با توجه به رابطه ۸ داریم:

$$k_r = \frac{kl}{2} \frac{\pi}{180} = \frac{l}{\lambda} \frac{\pi^2}{180} = 0.6 * \frac{\pi^2}{180} = 0.0329 \quad (۱۶)$$

رابطه فوق شیب مونوپالس را بر حسب درجه نشان می دهد. حال باید انحراف معیار خطای زاویه را محاسبه کنیم. معادله زیر رابطه انحراف معیار خطای زاویه را بر حسب نسبت سیگنال به نویز و شیب مونوپالس نشان می دهد.

$$\sigma_\theta = \frac{1}{k_r \sqrt{2SNR}} = \frac{21.49}{\sqrt{SNR}} \quad (۱۷)$$

شکل ۷ **Error! Reference source not found.**

Reference source not found. نمودار انحراف معیار خطای

زاویه را بر حسب SNR نشان می دهد. در صورتی که SNR سیستم برابر با ۲۰ باشد انحراف معیار خطای زاویه نزدیک به ۲.۱ درجه است.

- Machine Learning (ICAML), Changsha, China, 2022, pp. 209-213, doi: 10.1109/ICAML57167.2022.00047.
- [9] W. Kederer and J. Detlefsen, "Direction of arrival (DOA) determination based on monopulse concepts," 2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8522), Sydney, NSW, Australia, 2000, pp. 120-123, doi: 10.1109/APMC.2000.925736.
- [10] S. P. Jacobs and J. A. O'Sullivan, "Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range-profiles," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, no. 2, pp. 364-381, April 2000, doi: 10.1109/7.845214.
- [11] Ozdemir, C. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2012; Volume 210.
- [12] Y. Li, M. Xing, J. Su, Y. Quan and Z. Bao, "A New Algorithm of ISAR Imaging for Maneuvering Targets with Low SNR," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, no. 1, pp. 543-557, Jan. 2013, doi: 10.1109/TAES.2013.6404119
- [13] Barton, D.K. Radar System Analysis and Modeling; Artech House: Boston, London, UK, 2004; Volume 1.
- [5] R. Masoumi, R. Kazemi and A. E. Fathy, "Design and Implementation of a Slant Polarized Wideband Vivaldi Antenna Array Feed for Monopulse Radar Reflectors," 2025 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), San Juan, PR, USA, 2025, pp. 33-36, doi: 10.1109/RWS62086.2025.10904835.
- [6] Morteza Mohammadi, and Farrokh Hojjat-Kashani, "Planar Eight Port Waveguide Mono-Pulse Comparator," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 6, 103-113, 2009.doi:10.2528/PIERC08122805.
- [7] M. Mohammadi, F. H. Kashani and J. Ghalibafan, "A compact planar monopulse combining network at W-band," 2009 5th IEEE GCC Conference & Exhibition, Kuwait, Kuwait, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEGCC.2009.5734259
- [8] T. Ito, R. Takahashi and K. Hirata, "An antenna arrangement for phase comparison monopulse DOA estimation using nonuniform planar array," 2011 8th European Radar Conference, Manchester, UK, 2011, pp. 277-280.