

تحلیل و شبیه‌سازی اثر اختلاف طول خطوط مبنا بر بهبود عملکرد اختلال دوبینی رترودایرکتیو دو حلقه‌ای

جعفر خلیل‌پور^{۱*}، یاسر غفاری^۲، میثم بیات^۳

۱- دانشیار، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)، ۲- کارشناسی ارشد، ۳- استادیار، دانشگاه هوایی شهید ستاری

(دریافت: ۹۸/۰۷/۱۴، پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۹)

چکیده

اختلال دوبینی یکی از انواع روش‌های حمله الکترونیکی است. اختلال دوبینی بر اساس پدیده فیزیکی گلینت تحلیل می‌گردد. این روش یک خطای زاویه‌ای در رادارهای ردیاب مونوپالس که در مقابل سایر روش‌های حمله الکترونیکی مقاوم هستند، ایجاد می‌کند. برای رسیدن به خطای مجاز زاویه‌ای و همچنین نسبت مناسبی از JSR در اخلاگر، روش پیاده‌سازی رترودایرکتیو چند حلقه‌ای مطرح گردیده است. در این نوع پیاده‌سازی، اختلاف طول حلقه‌های اخلاگر می‌تواند باعث ایجاد اختلاف فاز سیگنال ارسال شده به رادار قربانی گردد. اختلاف فاز سیگنال احتمال افزایش عملکرد بیکنی را به دنبال خواهد داشت. عملکرد بیکنی یک عملکرد مخرب در اخلاگر دوبینی است. در کارهای قبلی اختلاف فاز در محدوده ۱۸۰- تا ۱۸۰ درجه محاسبه و بر اساس آن تحلیل صورت گرفته است. این تحلیل، افزایش پیچیدگی محاسباتی غیر موردنیاز به سیستم تحمیل می‌کند. بر مبنای این تحلیل نیاز به مصالحه بین بهره دوبینی و احتمال عملکرد بیکنی وجود دارد. در این مقاله برای اولین بار اختلاف فاز به‌عنوان تابعی از طول خطوط مبنا و زاویه اخلاگر با رادار در نظر گرفته شده است. این تحلیل انجام شده بر مبنای روابط حاکم بر اختلاف فاز، طول مسیر و فرکانس ارسالی انجام شده است. این نوع تحلیل دارای پیچیدگی محاسباتی کمتر بوده و نتایج را کاربردی‌تر کرده است. روابط حاصل از این تحلیل و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، در حالتی که $dc2 \leq 15m$ گردد، احتمال عملکرد بیکنی وجود ندارد. بر این مبنا می‌توان سایر پارامترهای اخلاگر را بدون احتمال عملکرد بیکنی به‌منظور افزایش بهره دوبینی محاسبه کرد.

کلیدواژه‌ها: مونوپالس، گلینت، حمله الکترونیکی، دوبینی

Analysis and Simulation of the Effect of Baselines Length Differences on Performance Improvement of Dual-Loop Retrodirective Cross-Eye Jamming

J. Khalilpour*, Y. Ghafari, M. Baiat

Khatam al Anbia University

(Received: 06/01/2019; Accepted: 01/05/2019)

Abstract

Cross-Eye jamming is a type of electronic attack techniques. Cross-Eye jamming is analyzed based on Glint's physical phenomenon. This technique generates an angular error in monopulse tracking radars that are resistant to other electronic attack methods. A multiloop retrodirective implementation method has been proposed to obtain the angular permutation error and the appropriate ratio of the JSR in the jammer. In this type of implementation, the length difference of the jammer loop can cause the phase difference of the signal that is sent to the victim radar. The signal phase difference will increase the probability of beacon operation. Beacon operation is a destructive function in cross-eye jamming. In the previous work, the phase difference in the range of -180 to +180 degrees was calculated and analyzed. This analysis increases the computational complexity of the system without the need to impose it. According to this analysis, there is a need for tradeoff between the cross-eye gain and the probability of beacon operation. In this paper, phase difference is considered as a function of baseline length and jammer angle with radar. This analysis is based on the relationships governing the phase difference, path length, and frequency of transmission. This type of analysis has less computational complexity and makes the results more practical. The simulation results by MATLAB show that if $dc2 \leq 15m$, there will be no chance of beacon operation. On this basis, other jammer parameters can be calculated without the probability of beacon operation to increase cross-eye gain.

Keywords: Monopulse, Glint, Electronic Attack, Cross-Eye

۱. مقدمه

در کارهای قبلی برای محاسبه اختلاف فاز مورد نیاز جهت تحلیل، از اثر طول مسیر به طور مستقیم استفاده نشده است. بنابراین، برای نمایش عملکرد اخلاگر دوبینی و احتمال عملکرد بیکنی، اختلاف فاز در بازه ۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه لحاظ شده است [۱۱-۱۳]. در این مقاله فاز سیگنال ارسالی تابعی از طول خط مبنا و زاویه اخلاگر نسبت به رادار محاسبه شده است. به منظور جلوگیری از پیچیدگی‌های اضافی و تحلیل مناسب که قابلیت تعمیم به حلقه‌های بیشتر را داشته باشد، اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای هم‌راستا در نظر گرفته شده است. هدف محاسبه اختلاف فاز برای طول‌های مختلفی از خط مبنا در اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای است. در نهایت اثر این اختلاف فاز بر عملکرد اخلاگر دوبینی تجزیه و تحلیل می‌گردد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای خط مبنای کمتر از ۱۵ متر ($d_{c2} \leq 15m$) احتمال عملکرد بیکنی ناچیز است؛ بنابراین، برای این حالت می‌توان پارامترهای اخلاگر دوبینی را به منظور افزایش بهره دوبینی محاسبه نمود.

در ادامه و در بخش دوم تحلیل ریاضی از اختلال دوبینی دو حلقه‌ای و سناریوی مربوطه انجام می‌گردد. در بخش سوم به بررسی شرایطی که منجر به عملکرد بیکنی می‌شود پرداخته شده است. در بخش چهارم حساسیت بهره دوبینی به اختلاف فاز طول مسیر محاسبه شده است. در بخش پنجم بهره دوبینی کل برای تعدادی از پارامترهای مشخص، شبیه‌سازی و محاسبه شده است. در بخش ششم اثر اختلاف طول مسیر و بهبود کارایی در مقایسه با نتایج قبلی شبیه‌سازی و تحلیل شده است. در پایان نتیجه‌گیری از این تحلیل‌ها انجام شده است.

۲. تحلیل ریاضی اختلال دوبینی

در این بخش تحلیل ریاضی از اختلال دوبینی چند حلقه‌ای با تأکید بر بهره دوبینی کل انجام گردیده است. لازم به ذکر است در این تحلیل رادار مونوپالس مقایسه فاز مطرح می‌گردد، در حالی که نتایج برای هر نوع رادار مونوپالس قابل تعمیم است [۷ و ۱۰].

هندسه یک سیستم اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای کلی که علیه یک رادار مونوپالس مقایسه فاز عمل می‌کند در شکل (۱) نشان داده شده است. بازگشتی‌های کانال تفاضل و جمع از هر حلقه اخلاگر دوبینی عبارت است از [۸ و ۹]:

$$S_m = A_n e^{j\phi_n} P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) \dots \times \frac{1}{2} (1 + a_n e^{j\phi_n}) [\cos(2k_n) + \cos(2k_{cn})] \quad (1)$$

$$D_m = A_n e^{j\phi_n} P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) \dots \times j \frac{1}{2} [(1 + a_n e^{j\phi_n}) \sin(2k_n) + (1 - a_n e^{j\phi_n}) \sin(2k_{cn})] \quad (2)$$

اختلال دوبینی یک روش حمله الکترونیکی است که خطای زاویه‌ای را در رادار قربانی القاء می‌کند [۱-۳]. این خطا بر مبنای تحلیل گلینت انجام می‌گردد [۴-۵]. گلینت یک پدیده فیزیکی است که بر همه رادارها تأثیرگذار است. گلینت می‌تواند منجر به خطاهای زاویه‌ای بزرگ شود. چون اختلال دوبینی بر همه رادارها مؤثر است در نتیجه نسبت به سایر روش‌های حمله الکترونیکی مزیت دارد [۶]. دو چالش اساسی در رابطه با پیاده‌سازی اخلاگر دوبینی وجود دارد [۲]. اولین چالش وابسته به نسبت بالای JSR است که نتیجه‌ای از حذف‌کننده ذاتی سیگنال در اختلال دوبینی است. دومین چالش خطای مجاز زاویه‌ای بسیار خوب و مورد نیاز برای رسیدن به خطاهای بزرگ زاویه‌ای است. چالش‌های فوق باعث شد تا در اغلب منابع چاپ‌شده قبل از سال ۲۰۰۰، پیاده‌سازی اختلال دوبینی به طور جدی مطرح نشود. با پیشرفت فناوری، روش‌های اختلال دوبینی بر رادارهای ردیاب مونوپالس و همچنین روش اختلال دوبینی مطرح گردید [۲ و ۶]. یکی از روش‌های پیاده‌سازی اختلال دوبینی، پیاده‌سازی رترودایرکتیو است. در برخی از مقالات پیاده‌سازی رترودایرکتیو اختلال دوبینی مطرح شده است [۷-۸]. سیستم رترودایرکتیو سیستمی است که سیگنال‌ها را از یک سمت دریافت و این سیگنال‌ها را از سمت دیگر سیستم ارسال می‌کند. با این حال پیاده‌سازی غیررترودایرکتیو اختلال دوبینی، نیز وجود دارد که تلورانس زیادی بر روی سیستم اخلاگر دوبینی ایجاد می‌کند. این امر پیاده‌سازی آن را عملاً مشکل می‌سازد. تعدادی از پیاده‌سازی‌های اخلاگر دوبینی غیررترودایرکتیو مانند اخلاگر دوبینی فقط ارسال و اخلاگر دوبینی بر پایه تکرارکننده تنها امکان‌پذیر است. این موارد در دیگر گزارش‌ها [۳] و [۸] بیان شده و محدودیت‌های عملی آن‌ها نیز مطرح می‌گردد. برای غلبه بهتر بر چالش‌های عنوان‌شده، استفاده از اختلال دوبینی چند حلقه‌ای مطرح گردیده است [۹]. مقدار JSR مورد نیاز از هر حلقه اخلاگر، با استفاده هم‌زمان از بیشتر از یک حلقه، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، درجه‌های اضافی از آزادی که به وسیله حلقه‌های متعدد ایجاد می‌گردد، به این معنی است که خطای مجاز مورد نیاز کاهش یافته است. در نتیجه خطاهای زاویه‌ای بزرگ‌تر و یا پوشش زاویه‌ای بیشتر به دست می‌آید [۱۰]. در اختلال دوبینی چند حلقه، اختلاف طول مسیر سیگنال‌ها از طریق هر حلقه اخلاگر می‌تواند بر عملکرد آن تأثیر داشته باشد. این تأثیر باعث کاهش خطای زاویه‌ای القاء شده در رادار قربانی می‌شود. در نتیجه یک بازگشتی قدرتمند در موقعیت اخلاگر ایجاد می‌گردد. به این عملکرد، عملکرد بیکنی گفته می‌شود.

- θ_{cn} چرخش جهت به پهلو حلقه اخلاگر n ام از رادار است.
- همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ϕ_n و a_n به ترتیب اندازه و فاز یک‌جهت از حلقه اخلاگر n ام نسبت به جهت عکس از طریق همان حلقه اخلاگر هستند.
- الگوی $P_r(\theta)$ الگوی عناصر سازنده آنتن رادار است. $P_{cn}(\theta)$ الگوی آنتن‌های حلقه‌های اخلاگر n ام هستند.
- β ثابت آزاد فضای آزاد و d_r مراکز فاز عناصر آنتن رادار است. تقریبها در معادلات (۴)، (۵) و (۶) برای سناریوهای اختلال دویینی کاربردی که $d_{cn} \gg r$ مناسب هستند.
- با توجه به برگشتی‌های کانال جمع و تفاضل در معادلات (۱) و (۲) بالا، نسبت مونوپالس کل برای n حلقه عبارت است از [۱۱]:

$$M_M = \mathfrak{I} \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N D_m}{\sum_{n=1}^N S_m} \right\} \quad (7)$$

از طرفی زاویه نمایش داده‌شده با استفاده از رابطه زیر از نسبت مونوپالس محاسبه می‌شود [۱۴ و ۴]:

$$M_M = \tan \left[\beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_i) \right] \approx \tan(k_i) \quad (8)$$

در این رابطه θ_i زاویه نمایش داده‌شده مونوپالس است و k_i مقدار معادله (۴) با فرض $\theta_r = \theta_i$ است. تخمین در معادله (۸) زمانی که θ_e کوچک است دقیق است.

با جایگذاری معادلات (۱) و (۲) در معادله (۷) نسبت مونوپالس به‌صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$M_M = \tan(k) + \frac{1}{2 \cos^2(k)} \times \Re \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) A_n e^{j\phi_n} \times (1 - a_n e^{j\phi_n}) \sin(2k_{cn})}{\sum_{n=1}^N P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) A_n e^{j\phi_n} \times (1 + a_n e^{j\phi_n})} \right\}$$

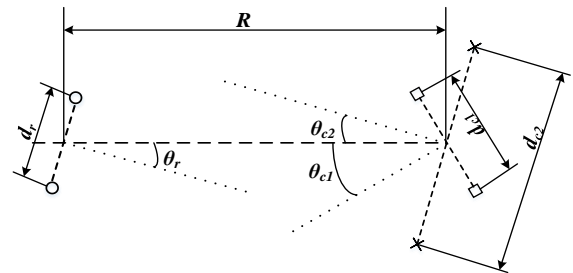
در مرجع [۷] با فرض $\cos(2k_{cn}) \approx 1$ ساده‌سازی انجام شده است. با توجه به این‌که مشخصات آنتن مونوپالس مقایسه فاز عمدتاً به-وسیله جداسازی دو عنصر آنتن رادار مشخص می‌شوند [۴]، الگوی عناصر آنتن رادار $P_r(\theta)$ می‌تواند فقط با تغییر زاویه خیلی آهسته مورد انتظار باشد. به‌طور خاص، تغییرات محدوده برد زاویه‌ای آنتن‌های اخلاگر ($\theta_r - \theta_{en}$ to $\theta_r + \theta_{en}$) ناچیز فرض

$$P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) = P_r(\theta_r - \theta_{en}) P_r(\theta_r + \theta_{en}) \quad (3)$$

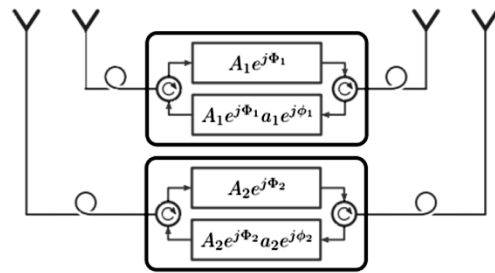
$$\times P_{cn}(\theta_{cn} - \theta_{en}) P_{cn}(\theta_{cn} + \theta_{en})$$

$$k_n = \beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_r) \cos(\theta_{en}) \approx \beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_r) \quad (4)$$

$$k_{cn} = \beta \frac{d_r}{2} \cos(\theta_r) \sin(\theta_{en}) \approx \beta \frac{d_r}{2} \cos(\theta_r) \theta_{en} \quad (5)$$



شکل ۱. هندسه درگیری اخلاگر دویینی و رادار مونوپالس [۹]



شکل ۲. پارامترهای اخلاگر دویینی [۹]

چون θ_{en} نصف زاویه تفکیک آنتن‌های حلقه اخلاگر n ام است که به‌وسیله رادار دیده می‌شود، با توجه به رابطه محاسبات آن می‌توان گفت عدد بسیار کوچکی است. بنابراین، می‌توان ساده‌سازی روابط (۴) و (۵) را انجام داد. فاکتور $A_n e^{j\phi_n}$ در معادله (۱) و (۲) به‌دلیل محاسبه تفاوت بین حلقه‌های اخلاگر است [۹]. این فاکتورها شامل اثرات تفاوت طول مسیر، اختلاف مؤلفه‌ها (عناصر) و اختلاف‌هایی مانند نتیجه عملکرد اخلاگر است. پارامترهای هندسی در شکل (۱) مشخص شده‌اند و سایر پارامترها عبارت‌اند از:

- θ_{en} نصف زاویه تفکیک آنتن‌های حلقه اخلاگر n ام است که به‌وسیله رادار دیده می‌شود و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta_{en} \approx \frac{d_{cn}}{2r} \cos(\theta_{cn}) \quad (6)$$

- d_{cn} فاصله آنتن برای حلقه n ام اخلاگر است (خط مبنای اخلاگر برای حلقه n)

$$M_M = \tan(k) + \frac{\beta d_r \cos(\theta_r)}{2 \cos^2(k)} \times \dots$$

$$\Re \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N [P_{cn}(\theta_{cn})]^2 A_n e^{j\Phi_n} \times (1 - a_n e^{j\phi_n}) s_m}{\sum_{n=1}^N [P_{cn}(\theta_{cn})]^2 A_n e^{j\Phi_n} \times (1 + a_n e^{j\phi_n})} \right\} \quad (15)$$

فاکتورهای بعد از خط اول معادله (۱۵) نقشی همانند بهره دوبینی در اختلال دوبینی تک حلقه (معادل اثر گلینت [۴، ۷] و [۸]) انجام می‌دهد. بنابراین، معادله بهره دوبینی برای یک اخلاگر دوبینی رترودایرکتیو چند حلقه‌ای عبارت است از [۸]:

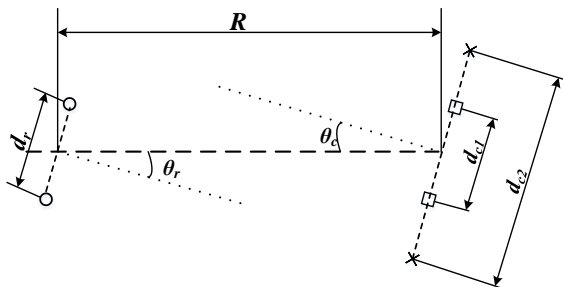
$$G_{CN} = \Re \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N [P_{cn}(\theta_{cn})]^2 A_n e^{j\Phi_n} \times (1 - a_n e^{j\phi_n}) s_m}{\sum_{n=1}^N [P_{cn}(\theta_{cn})]^2 A_n e^{j\Phi_n} \times (1 + a_n e^{j\phi_n})} \right\} \quad (16)$$

که با جایگذاری آن در معادله (۱۵) نسبت مونوپالس به صورت رابطه ۱۷ و ۱۸ بازنویسی شود [۸]:

$$M_M \approx \tan(k) + \frac{k_c}{\cos^2(k)} G_{CN} \quad (17)$$

$$\approx \frac{\sin(2k) + \sin(2k_c) G_{CN}}{\cos(2k) + \cos(2k_c)} \quad (18)$$

حال تأثیر اختلاف فاز ناشی از اختلاف طول مسیر بر روی بهره دوبینی رترودایرکتیو دو حلقه‌ای هم‌راستا (شکل ۳) مطرح خواهد شد.



شکل ۳. اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای هم‌راستا [۱۰]

با توجه به این که θ_c برای هر دو حلقه یکی است، در نتیجه فاکتور الگوی آنتن دو حلقه اخلاگر برابر بوده و بهره دوبینی دو حلقه‌ای با در نظر گرفتن معادله (۱۶) به صورت معادله زیر می‌شود [۱۰]:

$$G_{C2} = \Re \left\{ \frac{(1 - a_2 e^{j\phi_2}) + (1 - a_1 e^{j\phi_1}) A e^{j\Phi} s_{r1}}{(1 + a_2 e^{j\phi_2}) + (1 + a_1 e^{j\phi_1}) A e^{j\Phi}} \right\} \quad (19)$$

برای سادگی روابط $A = A_1 / A_2$ و $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ فروض شده است. برای حلقه اخلاگر ۲ (حلقه بیرونی) نسبت خط مبنا یک

می‌شود و با یک درجه بالایی از دقت خصوصاً نزدیک جهت محور رادار منجر به رابطه زیر می‌گردد [۷]:

$$P_r(\theta_r - \theta_{en}) \approx P_r(\theta_r + \theta_{en}) \approx P_r(\theta_r) \quad (10)$$

یک استدلال مشابه می‌تواند برای آنتن‌های اخلاگر به کار برده شود تا به رابطه ۱۱ به دست آید [۷]:

$$P_{cn}(\theta_{cn} - \theta_{en}) \approx P_{cn}(\theta_{cn} + \theta_{en}) \approx P_{cn}(\theta_{cn}) \quad (11)$$

چون آنتن‌های اخلاگر پهنای باند گسترده برای رسیدن به پوشش زاویه‌ای بزرگ دارند، ساده‌سازی برای آنتن‌های اخلاگر باید دقیق‌تر از عناصر آنتن رادار در معادله (۱۰) باشد. اگر از آنتن آرایه فازی استفاده شود پرتوهای اصلی نوک تیز و به سوی رادار تهدید است، بنابراین، شکل فاکتور آنتن در معادله (۳) به صورت رابطه زیر ساده می‌گردد [۱۰]:

$$P_{an}(\theta_r, \theta_{cn}, \theta_{en}) \approx [P_r(\theta_r) P_{cn}(\theta_{cn})]^2 \quad (12)$$

فاکتورهای $P_r(\theta_r)$ در صورت و مخرج معادله (۹) ظاهر شده‌اند. بنابراین، الگوهای عناصر آنتن رادار در نسبت مونوپالس (M_M) حذف می‌شوند. اگر آنتن‌های اخلاگر یکسان و در یک خط سیر مستقیم باشند، الگوهای آنتن اخلاگر حذف خواهند شد [۱۰].

نسبت خط مبنا ی اخلاگر به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$s_m = \frac{\sin(2k_{cn})}{\sin(2k_{cN})} \quad (13)$$

که N نشان دهنده بزرگ‌ترین حلقه اخلاگر است. از طرفی با توجه به فرض $\cos(2k_{cn}) \approx 1$ خواهیم داشت $\sin(2k_{cn}) = 2k_{cn}$. با این فرض معادله (۱۳) به صورت زیر ساده می‌گردد [۱۰]:

$$s_m = \frac{\sin(2k_{cn})}{\sin(2k_{cN})} \approx \frac{k_{cn}}{k_{cN}} = \frac{\theta_{en}}{\theta_{eN}} = \frac{d_{cn} \cos(\theta_{cn})}{d_{cN} \cos(\theta_{cN})} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۴) نسبت خط مبنا ی اخلاگر بر پایه مقادیر k_{cn} است که به طور مستقیم بر خطای القاء شده در رادار تهدید اثر می‌گذارد. این تعریف نشان می‌دهد نسبت خط مبنا علاوه بر طول d_{cn} به زاویه چرخش حلقه اخلاگر (θ_{cn}) نیز وابسته است.

با توجه به ساده‌سازی‌های انجام شده، معادله (۹) به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۸]:

$$0 = G_{CN} \quad (۳۳)$$

$$0 = c_1 + c_2 \cos(\Phi) + c_3 \sin(\Phi) \quad (۳۴)$$

$$0 = c_1 + \sqrt{c_2^2 + c_3^2} \times [\cos(\theta_o) \cos(\Phi) + \sin(\theta_o) \sin(\Phi)] \quad (۳۵)$$

$$0 = c_1 + \sqrt{c_2^2 + c_3^2} \cos(\Phi - \theta_o) \quad (۳۶)$$

$$\Phi = \pm \arccos\left(-\frac{c_1}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}}\right) + \theta_o \quad (۳۷)$$

$$\Phi = \pm \theta_b + \theta_o \quad (۳۸)$$

در روابط بالا فرض‌های زیر انجام شده است [۱۰]:

$$\cos(\theta_o) = \frac{c_2}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}} \quad (۳۹)$$

$$\sin(\theta_o) = \frac{c_3}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}} \quad (۴۰)$$

زاویه مبنای^۱ (θ_b) محدوده اختلاف‌های فاز طول مسیر (Φ) که از عملکرد بیکنی اجتناب می‌کند را تعیین می‌کند. زاویه انحراف^۲ (θ_o) تعیین می‌کند این محدوده اختلاف‌های طول مسیر در چه موقعیتی قرار دارد.

۳-۱. زاویه مبنا

زاویه مبنای (θ_b) مقدار محدوده‌ای از اختلاف‌های فاز طول مسیر (Φ) که عملکرد بیکنی در این محدوده غیرممکن است را تعیین می‌کند. مقدار صفر زاویه مبنا به این معنی است که عملکرد بیکنی غیرممکن است.

با استفاده از روابط (۳۷) و (۳۸) زاویه مبنا به صورت رابطه (۴۱) به دست می‌آید [۱۱]:

$$\theta_b = \arccos\left(-\frac{c_1}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}}\right) \quad (۴۱)$$

و ماهیت تابع Arccos در رابطه (۴۱) به این معنی است که اگر روابط (۴۲) و (۴۳) برقرار باشد از عملکرد بیکنی اجتناب می‌شود [۱۱].

$$\left|-\frac{c_1}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}}\right| > 1 \quad (۴۲)$$

است. درحالی‌که برای حلقه اخلاگر ۱ (حلقه درونی) نسبت خط مبنا کمتر از یک است.

با بازنویسی معادله (۱۹)، اثر اختلاف‌فاز بین دو حلقه اخلاگر (Φ) بر روی بهره دوبینی (G_{C2}) پررنگ‌تر می‌شود [۱۰].

$$G_{C2} = \frac{c_1 + c_2 \cos(\Phi) + c_3 \sin(\Phi)}{c_4 + c_5 \cos(\Phi) + c_6 \sin(\Phi)} \quad (۲۰)$$

مقادیر c_n از روابط زیر استخراج می‌گردد [۸ و ۱۰].

$$c_1 = (1 - a_1^2) A^2 s_{r1} + (1 - a_2^2) \quad (۲۱)$$

$$c_2 = (1 + a_1 \cos(\phi_1) - a_2 \cos(\phi_2) - a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + [1 - a_1 \cos(\phi_1) + a_2 \cos(\phi_2) - a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)] s_{r1}) A \quad (۲۲)$$

$$c_3 = -(a_1 \sin(\phi_1) + a_2 \sin(\phi_2) - a_1 a_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) - [a_1 \sin(\phi_1) + a_2 \sin(\phi_2) + a_1 a_2 \sin(\phi_1 - \phi_2)] s_{r1}) A \quad (۲۳)$$

$$c_4 = [1 + a_1^2 + 2a_1 \cos(\phi_1)] A^2 + 1 + a_2^2 + 2a_2 \cos(\phi_2) \quad (۲۴)$$

$$c_5 = 2[1 + a_1 \cos(\phi_1) + a_2 \cos(\phi_2) + a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)] A \quad (۲۵)$$

$$c_6 = -2[a_1 \sin(\phi_1) - a_2 \sin(\phi_2) + a_1 a_2 \sin(\phi_1 - \phi_2)] A \quad (۲۶)$$

با توجه به این‌که تابع‌نمایی مختلط $e^{j\phi}$ در صورت و مخرج G_{C2} در معادله (۱۹) ظاهر شده، فرم معادله (۲۰) قابل‌انتظار است. استفاده از حلقه‌های اخلاگر معادلات (۲۱) تا (۲۶) را به صورت زیر ساده می‌کند. هرچند که دقت نتایج از حالت کلی کمتر می‌شود لیکن ساده‌سازی قابل‌توجهی حاصل می‌گردد. با این فرض خواهیم داشت [۸ و ۱۰]:

$$c_1 = (1 - a^2)(1 + A^2 s_{r1}) \quad (۲۷)$$

$$c_2 = (1 - a^2) A(1 + s_{r1}) \quad (۲۸)$$

$$c_3 = -2a \sin(\phi) A(1 - s_{r1}) \quad (۲۹)$$

$$c_4 = [1 + a^2 + 2a \cos(\phi)](1 + A^2) \quad (۳۰)$$

$$c_5 = 2[1 + a^2 + 2a \cos(\phi)] A \quad (۳۱)$$

$$c_6 = 0 \quad (۳۲)$$

۳. پتانسیل عملکرد بیکنی

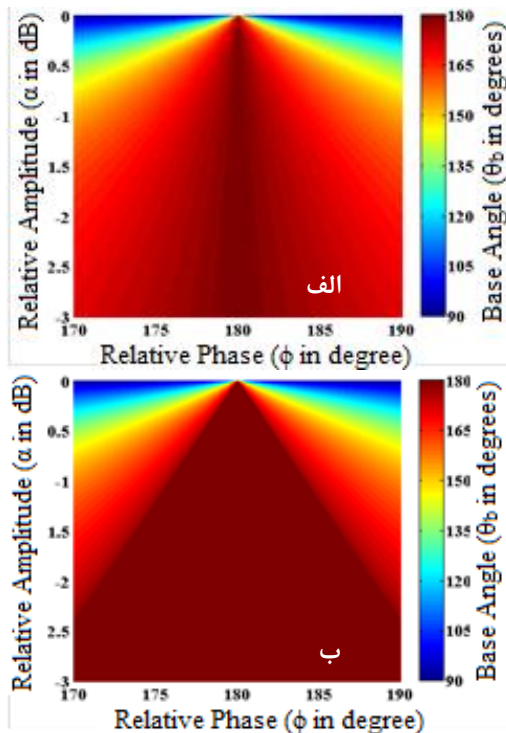
اخلاگر دوبینی زمانی همانند یک بیکن عمل می‌کند که بهره دوبینی صفر شود ($G_{CN} = 0$) [۱۱ و ۱۲]. این نتیجه نامطلوب است زیرا هدف هر اخلاگر مقابله با عملکرد رادار تهدید است نه کمک به آن.

بهره دوبینی دو حلقه‌ای اگر برابر صفر شود داریم [۱۱]:

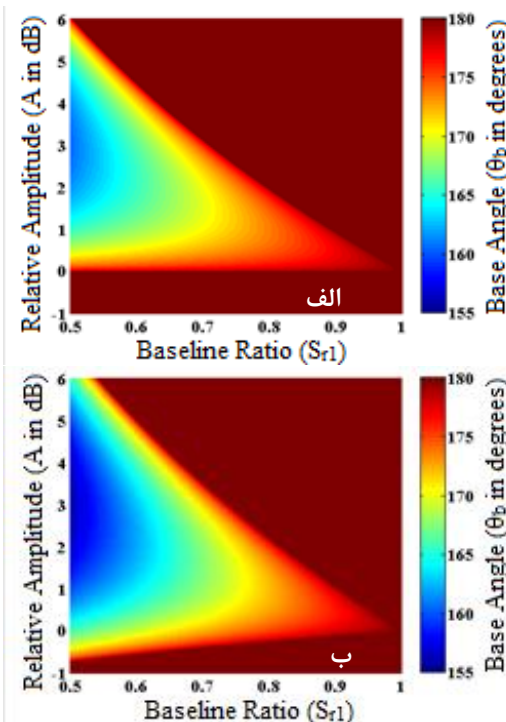
¹ Base Angle

² Offset Angle

شکل (۵) زاویه مبنا را به‌عنوان تابعی از پارامترهای حلقه اخلاگر (A و s_{r1}) با مقادیر ثابتی از a و ϕ نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود هر چه نسبت خط مبنا به اخلاگر به یک نزدیک‌تر می‌شود، احتمال عملکرد بیکنی کاهش می‌یابد.



شکل ۴. زاویه مبنا به‌عنوان تابعی از پارامترهای کانال اخلاگر (الف) $s_{r1}=0.5$ و $A=0dB$ و (ب) $s_{r1}=0.5$ و $A=-0.5dB$



شکل ۵. زاویه مبنا به‌عنوان تابعی از پارامترهای کانال اخلاگر (الف) $\phi = 180^\circ$ و $a = -1dB$ و (ب) $\phi = 175^\circ$ و $a = -1dB$

$$\left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{c_3}{c_1}\right)^2 < 1 \quad (۴۳)$$

که در آن با توجه به تعریف $|c_1| = c_1$ است، زیرا $0 \leq a \leq 1$ و $A > 0$ است. با جایگذاری (۲۷) تا (۳۰) در (۴۳) داریم [۱۱]:

$$\left[\frac{A(1+s_{r1})}{1+A^2s_{r1}}\right]^2 + \left[\frac{2a \sin(\phi)}{1-a^2} \cdot \frac{A(1-s_{r1})}{1+A^2s_{r1}}\right]^2 < 1 \quad (۴۴)$$

رابطه (۴۴) نتیجه را با توجه به پارامترهای اخلاگر ϕ ، A ، و s_{r1} بیان می‌کند.

تنظیم $A=0$ یا $A \rightarrow \infty$ سمت چپ معادله (۴۴) را صفر می‌کند. در نتیجه معادله نابرابری اقلان می‌شود. این دو شرط مطابق غیرفعال کردن یکی از حلقه‌های اخلاگر است. بنابراین، انتظار می‌رود که یک اخلاگر تک حلقه به‌وسیله اختلاف‌های طول مسیر تحت تأثیر نباشد. واضح است که این نتیجه، درستی نتایج را تأیید می‌کند.

داشتن مقادیر حلقه اخلاگر برای حالت ($A=1$) منطقی است، زیرا احتمال دارد سخت‌افزار مشابهی برای همه حلقه‌های اخلاگر مورد استفاده قرار گیرد. این فرض، قسمت اول سمت چپ معادله (۴۴) را برابر با یک می‌نماید. در نتیجه این اطمینان حاصل می‌شود که نابرابری همیشه نقض می‌شود. بنابراین، وقتی حلقه‌های اخلاگر دامنه یکسان داشته باشند، اختلاف‌های طول مسیر و سایر پارامترها همیشه می‌تواند باعث شود عملکرد یک اخلاگر دوبینی رتروپراکتیو چند حلقه مانند یک بیکن شود.

تحلیل معادله (۴۴) نشان می‌دهد اختلاف‌فاز حلقه‌های اخلاگر قادر به تبدیل یک اخلاگر دوبینی به یک بیکن است. از طرفی این شرایط، بهبود عملکرد اخلاگر با داشتن حلقه‌های متعدد را از بین می‌برد. در واقع هدف اصلی این است که بین افزایش بهره دوبینی و احتمال عملکرد بیکنی تناسب ایجاد کرد. عدم تطبیق‌های بیش‌ازحد اگرچه احتمال عملکرد بیکنی را کاهش می‌دهد اما با کاهش بهره دوبینی (G_{CN}) اثر اخلاگر دوبینی را کاهش می‌دهد [۱۱]. شکل (۴) زاویه مبنا را به‌عنوان تابعی از پارامترهای کانال اخلاگر (ϕ و a) نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر تطبیقی از حلقه‌های اخلاگر (A و s_{r1}) ثابت فرض شده‌اند. در شکل (۴)، ناحیه قرمز جایی را که زاویه مبنا وجود ندارد را نشان می‌دهد. در این ناحیه عملکرد بیکنی غیرممکن می‌گردد. همچنین این شکل نشان می‌دهد عدم تطبیق‌های هرچند کوچک به‌طور قابل توجهی عملکرد بیکنی را کاهش می‌دهد.

۳-۲. زاویه انحراف

زاویه انحراف (θ_o) ، به‌عنوان زاویه مرکز محدوده اختلاف‌فاز طول مسیر (Φ) در حالتی که عملکرد بیکنی غیرممکن است، تعریف می‌شود. با توجه به روابط (۳۹) و (۴۰) زاویه انحراف از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_o = \arctan\left(\frac{c_3}{c_2}\right) = \arctan\left(\frac{2a \sin(\phi)}{1-a^2} \cdot \frac{1-s_{r1}}{1+s_{r1}}\right) \quad (45)$$

یک مشاهده مهم این است که زاویه انحراف به‌وسیله تطبیق دامنه اخلاگر (A) تأثیر نمی‌پذیرد. از طرفی با مقادیر منطقی از a ، ϕ و s_{r1} پیش‌بینی کنیم که زاویه انحراف (θ_o) برای سامانه‌های اخلاگر دویینی عملی، کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود (با توجه به اینکه $-180 \leq \Phi \leq +180$).

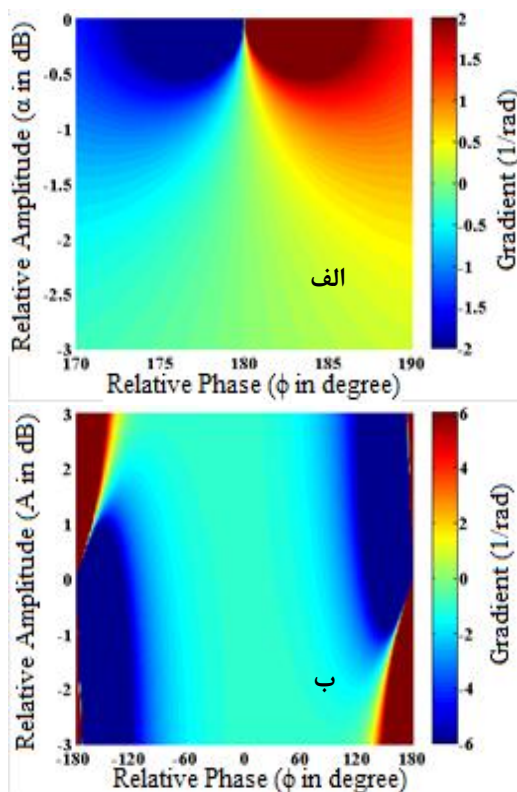
شکل (۶) اثر پارامترهای کانال اخلاگر (ϕ, a) را بر روی زاویه انحراف نشان می‌دهد. مهم‌ترین مشاهده از شکل (۶) این است که زاویه انحراف برای محدوده واقعی پارامترهای کانال اخلاگر نشان داده‌شده، کوچک است؛ بنابراین، محدوده بزرگی از اختلاف‌های فاز طول مسیر (Φ) در اطراف صفر وجود دارد که یک اخلاگر دویینی رترودایرکتیو چند حلقه‌ای همانند یک بیکن عمل نخواهد کرد.

خطای زاویه‌ای ثابت دلالت دارد. گرادیان بهره دویینی دو حلقه‌ای (G_{C2}) با ملاحظه تفاوت فاز حلقه (Φ) به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

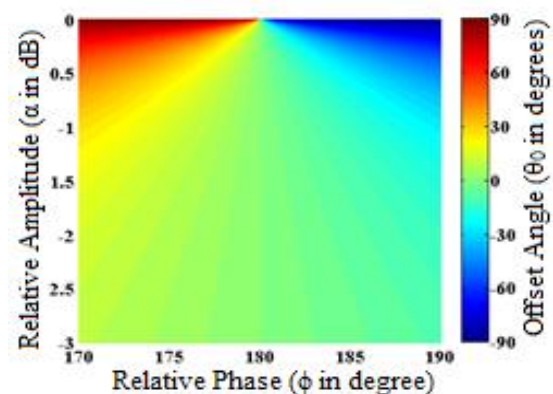
$$\frac{dG_{C2}}{d\phi} = -A(1-s_{r1}) \times \frac{2a \sin(\phi) [2A + (1+A^2) \cos(\phi)] - \dots (1-a^2)(1-A^2) \sin(\phi)}{[1+a^2+2a \cos(\phi)] \times \dots [1+A^2+2A \cos(\phi)]^2} \quad (46)$$

قسمت $A(1-s_{r1})$ در معادله (۴۶) نشان می‌دهد وقتی نسبت خطوط مینای اخلاگر به سمت یک میل پیدا کند گرادیان بهره دویینی کاهش می‌یابد. این نتیجه قابل پیش‌بینی است زیرا که خطوط مینای مساوی به‌طور ذاتی به این معنی است که هیچ تفاوت طول مسیری وجود ندارد [۱۰ و ۱۳].

معادله (۴۶) نشان می‌دهد که بهره دویینی وقتی اختلاف طول مسیر نزدیک 180° است، به تغییرات اختلاف طول مسیر حساس خواهد بود. علاوه بر این، کاهش دامنه حلقه درونی $(A \rightarrow 1)$ مقدار تغییر این فاکتور را کاهش خواهد داد. در نتیجه منجر به پایداری بیشتر مقادیر بهره دویینی در محدوده کامل اختلاف‌های طول مسیر خواهد شد. گرادیان بهره دویینی به‌عنوان یک تابع از پارامترهای کانال اخلاگر $(a$ و $\phi)$ در شکل (۷-الف) و پارامترهای حلقه اخلاگر $(A$ و $\Phi)$ در شکل (۷-ب) نشان داده‌شده است.



شکل ۷. گرادیان بهره دویینی G_{C2} (الف) $\Phi=0$ و $s_{r1}=0.5$ و $A=0dB$ و $\phi=175^\circ$ (ب) $a=-1dB$ و $\phi=175^\circ$ و $s_{r1}=0.5$



شکل ۶. زاویه انحراف به‌عنوان تابعی از پارامترهای کانال اخلاگر $(a$ و $\phi)$ برای $s_{r1}=0.5$

۴. حساسیت بهره دویینی به اختلاف‌فاز طول مسیر

حساسیت بهره دویینی (G_{CN}) به فاز طول مسیر (Φ) را می‌توان با گرادیان بهره دویینی کل به فاز طول مسیر اندازه‌گیری کرد. گرادیان‌های کوچک مطلوب هستند زیرا نشان می‌دهند که بهره دویینی به‌طور قابل‌توجهی قابل‌تغییر نخواهد بود. چون در این حالت فاز طول مسیر تغییر می‌کند (G_{CN}) حساسیت کمی به Φ دارد. خطای زاویه‌ای القاء شده در رادار تهدید با بهره دویینی تعیین می‌شود. بنابراین، یک بهره دویینی ثابت به یک

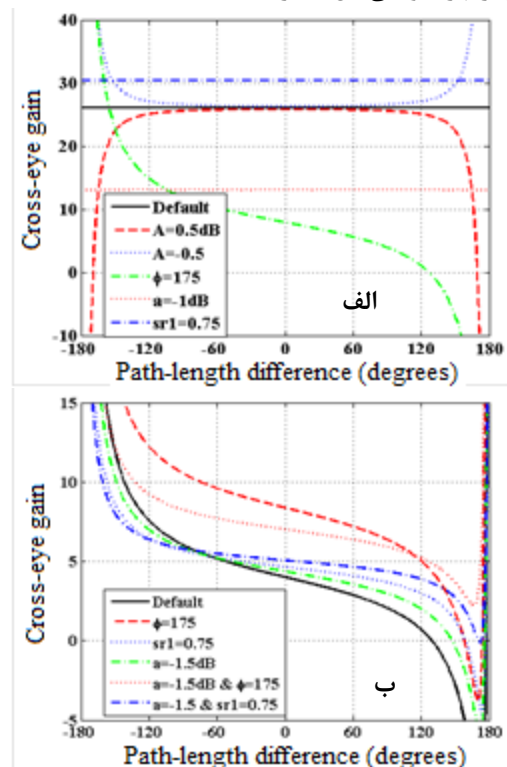
دوبینی (G_{C2}) بزرگ شود، هرچند خط مبنای کوچک حلقه درونی ($s_{r1}=0.5$) بهره را تا حدودی کاهش خواهد داد. نتیجه مهم از شکل (۸) این است که اختلافهای فاز طول مسیر (Φ) یک اثر قابل توجه بر روی عملکرد اخلاگر دوبینی چندحلقه‌ای دارد. پارامترهای موردنیاز برای رسیدن به بهره دوبینی بالا (G_{CN}) همیشه مناسب نیستند و حتی انحراف کوچک از مقادیر موردنیاز حساسیت به اختلافهای طول مسیر را دوباره نشان می‌دهد. وقتی که اختلافهای فاز طول مسیر کوچک باشد ($\Phi \approx 0^\circ$) گرادیان بهره دوبینی در شکل (۸) کوچک است. وقتی اختلاف فاز نزدیک به 180° می‌شود، گرادیان بهره دوبینی افزایش می‌یابد. چون فاز کانال اخلاگر و دامنه‌های حلقه اخلاگر به خوبی منطبق شده‌اند، پارامترهای قراردادی در شکل (۸-الف) به یک گرادیان دوبینی صفر برای همه مقادیر اختلاف فاز طول مسیر منتج خواهد شد. تغییر دامنه حلقه اخلاگر (A) در شکل (۸-الف) به این معنی است که در همه زوایا گرادیان بیشتر از صفر نیست. افزایش دامنه حلقه درونی ($A > 1$) منجر به احتمال عملکرد بیکنی ($G_{CN} = 0$) برای مقادیر خاصی از اختلافهای فاز طول مسیر خواهد شد. کاهش دامنه حلقه درونی ($A < 1$) از عملکرد بیکنی جلوگیری می‌کند. بنابراین، حتی تغییرات دامنه کوچک ($-0.5dB \leq A \leq 0.5dB$) می‌تواند به نتایج متفاوت برای اختلافهای فاز طول مسیر بزرگ ($\Phi \approx \pm 180^\circ$) منجر شود. همان‌طور که در مورد $\phi = 175^\circ$ در شکل (۸-الف) دیده می‌شود، تنظیم فاز کانال اخلاگر، دور از شرایط ایده‌آل ($\phi \neq 180^\circ$) بهره دوبینی (G_{C2}) را کاهش خواهد داد و منجر به یک گرادیان غیر صفر می‌شود. تغییر پارامتر نهایی در شکل (۸-الف)، افزایش خط مبنای حلقه درونی (d_{cl}) است تا نسبت خط مبنا (s_{r1}) افزایش یابد. شکل (۸-ب) نمونه‌ای را نشان می‌دهد که تطبیق کانال اخلاگر قراردادی ($a = -1dB$ و $\phi = 170^\circ$) به‌طور قابل توجهی ضعیف‌تر از شکل (۸-الف) است. نتیجه اصلی تطبیق ضعیف‌تر اخلاگر، بهره دوبینی (G_{C2}) پایین‌تر است. همان‌طور که انتظار می‌رود، بهبود تطبیق فاز کانال اخلاگر ($\phi \rightarrow 180^\circ$) نشان‌دهنده افزایش بهره است. به‌طور شگفت‌انگیزی، عملاً تطبیق دامنه کانال اخلاگر بدتر ($a \rightarrow 0$) منجر به یک بهره دوبینی بیشتر برای اکثریت اختلافهای طول مسیر در دو مورد از سه مورد نشان داده‌شده در شکل (۸-ب) می‌شود. این نتیجه برخلاف معمول است، زیرا تطبیق بهتر دامنه کانال اخلاگر ($a \rightarrow 1$) معمولاً بهره دوبینی بالاتری را فراهم می‌کند. حقیقت این است که یک اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای اثر تغییرات پارامتر را پیچیده می‌سازد. به‌طور مهمی افزایش عدم تطبیق دامنه کانال اخلاگر ($a \rightarrow 0$) زاویه مبنا (θ_b) را برای $170^\circ \rightarrow \phi$ افزایش می‌دهد و عملکرد

نتیجه اولیه شکل (۷-الف) این است که سرعت تغییرات بهره دوبینی کوچک است. مگر آن‌که تطبیق دامنه کانال اخلاگر خوب باشد ($a \approx 1$). علاوه بر این، وقتی که تطبیق فاز کانال اخلاگر خوب باشد ($\phi \approx 180^\circ$) گرادیان پایین‌تر است.

شکل (۷-ب) نشان می‌دهد حساسیت هر دو پارامتر حلقه اخلاگر (A و Φ) وقتی که اختلاف فاز طول مسیر کوچک باشد ($\Phi \approx 0^\circ$)، خیلی کم است. نکته مهم این است که گرادیان در اکثر محدوده پارامترهای نشان داده‌شده، کوچک است. با این حال وقتی که اختلاف فاز طول مسیر به $\pm 180^\circ$ نزدیک می‌شود گرادیان با سرعت در حال افزایش است.

۵. بهره دوبینی کل

بهره دوبینی کل برای تعدادی از پارامترهای مختلف اخلاگر دوبینی محاسبه شده و در شکل (۸) نشان داده شده است. در هر نمودار، پارامترهای قراردادی مشخصی برای بررسی حالت‌های خاص از بهره دوبینی کل تغییر داده شده است.



شکل ۸. بهره دوبینی کل برای تعدادی از پارامترهای اخلاگر دو حلقه‌ای وقتی که پارامترهای پیش‌فرض عبارت‌اند از (الف) $s_{r1}=0.5$ و $A=0dB$ ، $\phi=180^\circ$ ، $a=-0.5dB$ (ب) $s_{r1}=0.5$ و $A=-0.5dB$ ، $\phi=170^\circ$ ، $a=-1dB$

پارامترهای قراردادی در شکل (۸-الف) کانال‌های اخلاگر ($\phi \approx 180^\circ$ و $a = -0.5dB$) و دامنه‌های حلقه اخلاگر خوب تطبیق شده ($A = 1$) را نشان می‌دهد. با این شرایط انتظار می‌رود بهره

فرکانس کاری رادار ۱۰GHz، برد رادار تا اخلاگر ۱۰Km و $\theta_c = \pm 60^\circ$ برای چرخش حلقه‌های اخلاگر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در بخش ۲ مطرح شد برای اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای اختلاف فاز $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه این اختلاف فاز به‌عنوان تابعی از اختلاف طول مسیر سه حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول $d_{c2} = 10m$ برای سکوهایی پرنده کوچک از جمله جنگنده‌هایی چون گریپن، F-16 و... محاسبه می‌گردد.

در حالت دوم $d_{c2} = 15m$ برای سکوهایی بزرگ‌تری چون Su-34، F-14، F-15 و در نهایت در حالت سوم هواپیماهای بمبافکن بزرگ از جمله B-1، Tu-160 و... با خط مبنای $d_{c2} = 40m$ شبیه‌سازی می‌گردد. در این شبیه‌سازی خط مبنای حلقه یک در بازه $0 < d_{c1} < d_{c2}$ متغیر در نظر گرفته می‌شود. بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین اختلاف فاز حاصله و همچنین شکل آن به‌عنوان تابعی از اختلاف طول مسیر و زاویه θ_c رسم شده است. لازم به ذکر است حلقه بیرونی حلقه شماره ۲ و بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. برای ساده‌سازی اخلاگر دوبینی دو حلقه‌ای هم‌راستا مانند شکل (۲) لحاظ شده است. در نتیجه نسبت خط مینا از تقسیم بازه فوق بر d_{c2} به‌دست می‌آید. یعنی $0 < s_{r1} = \frac{d_{c1}}{d_{c2}} < 1$ در نظر گرفته می‌شود. اثر اختلاف طول

خط مینا به‌صورت شکل (۱۰) حاصل می‌گردد. با توجه به شبیه‌سازی در برنامه MATLAB و محاسبه مقادیر اختلاف فاز در شکل (۱۰-الف) بزرگ‌ترین مقدار اختلاف فاز برای $d_{c2} = 10m$ ۳۰ درجه به‌دست می‌آید. بر اساس مباحث مطرح‌شده در بخش ۴ و ۵ و همچنین شکل‌های (۷) و (۸) احتمال عملکرد بیکنی در این بازه اختلاف فاز، بسیار پایین است. در شکل (۱۰-ب) بزرگ‌ترین مقدار اختلاف فاز برای $d_{c2} = 15m$ ۶۷ درجه محاسبه می‌گردد. در این حالت نیز طبق شکل‌های (۷) و (۸) عملکرد اخلاگر تا حدودی قابل‌قبول بوده و می‌توان اثر بیکنی را نادیده فرض کرد. در شکل (۱۰-ج) بزرگ‌ترین مقدار اختلاف فاز برای $d_{c2} = 40m$ ۴۸۰ درجه به‌دست می‌آید. در این حالت احتمال عملکرد بیکنی بسیار بالا بوده و اثر اختلاف طول مسیر باید به‌دقت در حالت‌های مختلف محاسبه گردد. چراکه در این حالت سکوی پرنده دارای حرکات و مانورهایی است که هر لحظه مقادیر θ_c و s_{r1} به‌شدت تغییر می‌کند.

مهم‌ترین نتیجه این است که اگر $d_{c2} < 15m$ باشد، بدون نگرانی از احتمال عملکرد بیکنی می‌توان سایر پارامترهای اخلاگر را برای حداکثر بهره دوبینی به‌دست آورد. درحالی‌که برای

بیکنی را غیرممکن می‌سازد. افزایش نسبت خط مینا (s_{r1}) در شکل (۸-ب) بهره دوبینی (G_{c2}) را در اکثر عدم تطبیق‌های فاز طول مسیر (Φ) افزایش می‌دهد. همان‌طور که بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته انتظار می‌رفت تغییر و اندازه هر یک از پارامترها بر مقدار بهره دوبینی و همچنین احتمال عملکرد بیکنی تأثیرگذار است. مهم‌ترین نکته این است که کمترین احتمال عملکرد بیکنی در اختلاف فاز صفر روی داده و بیش‌ترین احتمال در اختلاف فاز ۱۸۰ درجه است که با توجه به مطالب بیان‌شده و همچنین حساسیت بهره دوبینی قابل‌انتظار است.

۶. اثر اختلاف طول مسیر بر بهبود عملکرد اخلاگر

دوبینی

همان‌طور که در معادله (۱۹) نشان داده شد، بهره دوبینی وابسته به فازهای هر حلقه اخلاگر (Φ_n) است. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، این فازها به‌وسیله برد از رادار تا هر یک از آنتن‌های اخلاگر، تعیین شده‌اند.

$$r_{jn}(\theta_{cn}) = \sqrt{\left[R + \frac{d_{cn}}{2} \sin(\theta_{cn}) \right]^2 + \left[\frac{d_{cn}}{2} \cos(\theta_{cn}) \right]^2} \quad (۴۷)$$

مقادیر مثبت و منفی θ_{cn} متناظر با آنتن‌های اخلاگر دورتر و نزدیک‌تر هستند. طول مسیر کل برای هر حلقه اخلاگر عبارت است از:

$$r_m(\theta_{cn}) = r_{jn}(\theta_{cn}) + r_{jn}(-\theta_{cn}) \quad (۴۸)$$

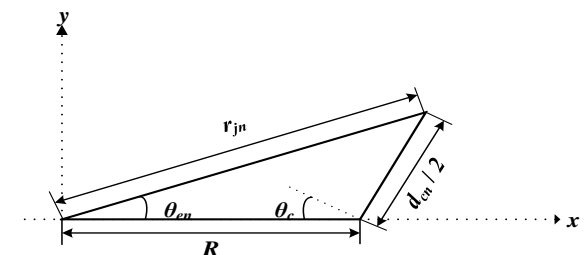
بنابراین، فاز هر حلقه با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Phi_n = \beta r_m \quad (۴۹)$$

و در نتیجه اختلاف فاز بین حلقه‌های n و m به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Phi_n - \Phi_m = \beta(r_n - r_m) \quad (۵۰)$$

برای هر حلقه اخلاگر n مقادیر متفاوت از d_{cn} و θ_{cn} به این معنی است که فازهای هر حلقه تغییر خواهند یافت. بر اساس معادله (۱۹) نشان داده شده است که این تغییرات فاز بر روی بهره دوبینی تأثیر خواهد گذاشت.



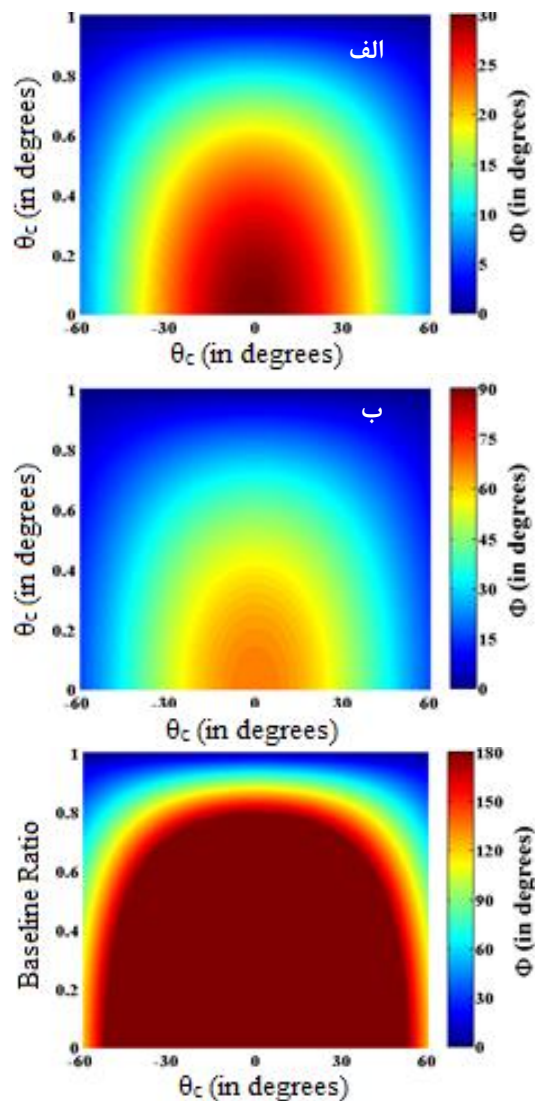
شکل ۹. محاسبه فاصله هر آنتن اخلاگر از رادار
حال با توجه به نتایج فراهم‌شده، اثر اختلاف طول مسیر بر اختلاف فاز $\Phi = \Phi_n - \Phi_m$ بررسی می‌شود. در این بررسی

تهدید، اخلاک‌گرهای دوبینی چند حلقه پیشنهاد شده است. اختلاف طول خطوط مبنا در حلقه‌های اخلاک‌گر باعث ایجاد اختلاف فاز در سیگنال ارسالی به سمت رادار تهدید می‌گردد. این اختلاف فاز می‌تواند بهره دوبینی را صفر کرده و باعث عملکرد بیکنی شود. در محاسبات صورت گرفته در کارهای قبل، اختلاف فاز در بازه 180° تا 180° درجه و به حالت کلی در نظر گرفته شده و تأثیر طول خطوط مبنا به صورت دقیق در نظر گرفته نشده است. در این مقاله برای اولین بار اختلاف فاز به عنوان تابعی از طول خطوط مبنا و زاویه چرخش اخلاک‌گر نسبت به رادار محاسبه گردیده است. این موضوع منجر به محاسبه دقیق بیشترین مقدار اختلاف فاز برای طول خط مبنا مورد نظر شده است. با داشتن این مقدار می‌توان احتمال عملکرد بیکنی را به دست آورد. در نتیجه مقادیر بهینه سایر پارامترها را برای بهترین عملکرد اخلاک‌گر دوبینی به دست آورد. با توجه به محاسبات انجام شده و راهکار ارائه شده، مشخص گردید که برای اسکوهایی با طول خط مبنا کمتر از ۱۵ متر بدون نگرانی از احتمال عملکرد بیکنی می‌توان سایر پارامترهای حلقه‌های اخلاک‌گر را به منظور افزایش بهره دوبینی در نظر گرفت. هنگامی که طول خط مبنا افزایش یافته از جمله - برای مقدار مشخص شده در متن (۴۰ متر) - احتمال عملکرد بیکنی به شدت افزایش می‌یابد و در نتیجه کلیه مقادیر پارامترهای حلقه‌های اخلاک‌گر باید محاسبه تا از عملکرد بیکنی اجتناب گردد.

۸. مراجع ها

- [1] Neri, F. "Introduction to Electronic Defence System"; 2nd Edition, Raleigh NC, USA: Sci. Tech. Publishing, 2006.
- [2] Neri, F. "Anti-monopulse Jamming Techniques"; SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf. 2001, 2, 45-50.
- [3] Adamy, D. "Ew101: a First Course in Electronic Warfare"; Artech House, INC, 2001.
- [4] Samuel, M. S.; David, K. B. "Monopulse Principles and Techniques"; 2nd edition, Artech House, 2011.
- [5] Merrill M. Skolnik, "Radar Handbook"; 2nd Edition, McGraw Hill, 1991.
- [6] Neri, F. "Experimental Testing on Cross-eye Jamming"; Proc. AOC Int. Symp. Conf., Las Vegas, CA, USA, 2000.
- [7] Plessis, W. p. Du.; Odendaal, J. W.; Joubert, J. "Tolerance Analysis of Cross-Eye Jamming System"; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2011, 47, 740-745.
- [8] Plessis, W. P. Du.; Odendaal, J. W.; Joubert, J. "Extended Analysis of Retrodirective Cross-Eye Jamming"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2009, 57, 2803-2806.
- [9] Plessis, W. P. Du. "Cross-Eye Gain in Multi-loop Retrodirective Cross-eye Jamming"; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2016, 52, 875-882.

مقادیری از $d_{c2} \approx 40m$ بایستی بین بهره دوبینی حداکثری و احتمال عملکرد بیکنی مصالحه و به مقادیر بهینه و مطلوب دست پیدا کنیم. از طرفی کاهش بهره دوبینی باعث کاهش خطای زاویه‌ای القاء شده در رادار تهدید می‌گردد.



شکل ۱۰. محاسبه اختلاف فاز اخلاک‌گر دوبینی دو حلقه‌ای به عنوان تابعی از s_m و θ_c وقتی که (الف) $d_{c2}=10m$ (ب) $d_{c2}=15m$ و (ج) $d_{c2}=40m$

۷. نتیجه گیری

اختلال دوبینی یکی از انواع روش‌های حمله الکترونیکی است که بر مبنا پدیده فیزیکی گلینت طراحی شده است. مشکلات اساسی پیاده‌سازی این روش نسبت بالای JSR و تلورانس زاویه‌ای بالای آن است. به منظور رفع مشکلات فوق پیاده‌سازی رترودایرکتیو یا همدوس مطرح گردیده است. برای افزایش بهره دوبینی و در نتیجه آن افزایش خطای زاویه‌ای القاء شده در رادار

- [13] Falk, L. "Cross-eye Jamming of Monopulse Radar"; Proc. IEEE Waveform Diversity Design Conf. 2007, 209-213.
- [14] Liu, S. C. Dong, J. Xu.; Zhao, G.; Zhu, Y. "Analysis of Rotating Cross-Eye Jamming"; IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2015, 14, 939-942.
- [15] Liu, T.; Liao, D.; Wei, X.; Li, L. "Performance Analysis of Multiple-element Retrodirective Cross-eye Jamming Based on Linear Array"; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2015, 14, 939-942.
- [10] Plessis, W. P. Du. "Analysis of Path-Length Effects in Multiloop Cross-Eye Jamming"; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2017, 53, 740-745.
- [11] Plessis, W. P. Du. "Path-length Effects in Multiloop Retrodirective Cross-Eye Jamming"; IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2016, 15, 626-629.
- [12] Schleher, D. C. "Electronic Warfare in the Information Age", Norwood, MA, USA, Artech House, 1999.