



تصویرسازی با استفاده از سنسور آشکارساز حرکت مبتنی بر پدیده‌ی داپلر

سعید براتی^۱، سید علیرضا سیدین^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،
sbarati@mail.um.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،
seyedin@um.ac.ir

چکیده

مراقبت و نظارت بر محیط‌های مهم در هر شرایط جوی یکی از مهم‌ترین دلایل رشد تصویربرداری با امواج رادیویی است. پدیده داپلر تحولی شگرفی در سیستم‌های تصویربرداری با امواج رادیویی پدید آورد. در سیستم‌های تصویربرداری با استفاده از امواج رادیویی برای بهره‌مندی از پدیده داپلر حرکتی بین هدف و سیستم وجود دارد که این حرکت می‌تواند خطی یا دایروی و... باشد. در این مقاله به شبیه‌سازی و ساخت سیستم تصویرسازی با استفاده از سنسورهای آشکارساز حرکت مبتنی بر اثر داپلر پرداخته می‌شود. در این کار منشا پدیده داپلر حرکت سنسور بر روی یک محور دایره‌ای می‌باشد. در نهایت محدودیت‌ها و عوامل موثر بر کیفیت تصویر بیان می‌گردد.

کلمات کلیدی

تصویربرداری، امواج رادیویی، سنسور آشکارساز حرکت، پدیده‌ی داپلر

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای کنترل و نظارت بر محیط وجود دارد. در این حوزه روش‌هایی چون تصویربرداری توسط دوربین و تصویربرداری توسط امواج رادیویی به صورت معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عامل رشد و پیشرفت تصویربرداری با امواج رادیویی پدیده‌ی داپلر می‌باشد [۱]. این پدیده باعث بهبود قدرت تفکیک در رادارها و سیستم‌های تصویربرداری شد.

در سیستم‌های تصویربرداری با امواج رادیویی به نحوی حرکت میان هدف تصویربرداری و سکو ایجاد می‌گردد. از مهم‌ترین این سیستم‌ها می‌توان به رادار دهانه ترکیبی اشاره کرد.

از جمله کاربردهای مهم رادار دهانه ترکیبی زمین‌شناسی، هواشناسی، مانیتورینگ زمین و پیرامون، نقشه برداری ۲ و ۳ و ۴ بعدی، آشکارسازی تغییرات، کاربردهای فضایی و کاربردهای نظامی می‌باشد [۲].

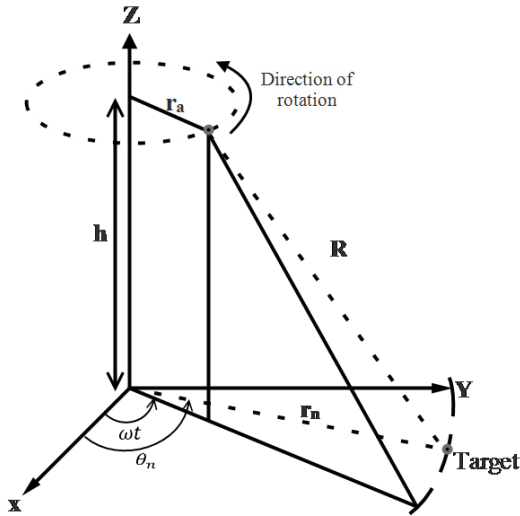
در این رادارها حرکت سکو به دو دسته حرکت سکوی خطی و حرکت سکوی چرخشی تقسیم می‌شود.

در حرکت سکوی خطی حرکت به صورت مستقیم بوده و تصویربرداری انجام می‌گردد اما در حرکت سکوی چرخشی رادار بر روی یک محور دایروی حرکت می‌کند و با توجه به هدف از بیرون یا درون محور دایروی تصویربرداری می‌کند [۳، ۴].

پساده سازی یک رادار دهانه ترکیبی چرخان در [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۵، ۶] به بررسی الگوریتم‌ها و نحوه تصویرسازی در رادار دهانه ترکیبی چرخشی پرداخته شده است.

از طرفی سنسورهای آشکارساز حرکت مبتنی بر اثر داپلر مانند پاداری ساده و در ابعاد کوچک می‌باشند. در [۷] با استفاده از سنسور آشکارساز حرکت مبتنی بر اثر داپلر به آشکارسازی سرعت و طول پرداخته شده است. مقاله [۸] استفاده از این سنسور برای بررسی وضعیت حضور خودرو در پارکینگ را بیان کرده است. در [۹-۱۳] موقعیت‌یابی هدف متحرک با استفاده از موج پیوسته دو فرکانسی

که در رابطه (۲)، $R(t)$ ، فاصله هدف n ام از سنسور در لحظه t ، r_a شعاع چرخش سنسور، ω سرعت زاویه ای چرخش سنسور، r_n و θ_n نیز به ترتیب برد زمینی هدف n ام و زاویه قرارگیری آن می‌باشد.



شکل ۲ نمایی از هندسه مورد استفاده و پارامترها

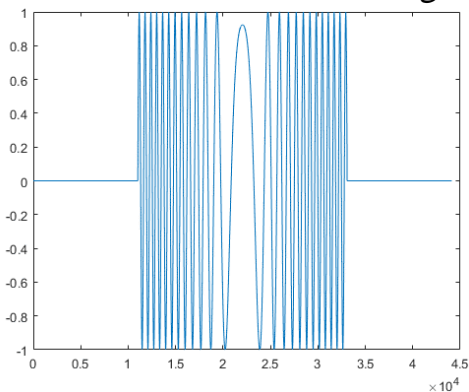
با توجه به رابطه (۱) که سیگنال ارسالی در سنسور آشکارساز حرکت را نشان می‌دهد و رابطه (۲) می‌توان سیگنال بازگشتی از یک هدف نقطه‌ای را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$S_R(t) = A_R \cos(2\pi f_c(t + \frac{2R(t)}{c})) \quad (3)$$

در رابطه (۳) نشان دهنده دامنه سیگنال دریافتی می‌باشد. بنابراین رابطه سیگنال داپلر خروجی از سنسور را می‌توان با انتقال به باند پایه و عبور از فیلتر پایین‌گذر به دست آورد که در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$S_{doppler}(t) = A_R \cos(2\pi f_c \frac{R(t)}{c}) \quad (4)$$

با بررسی رابطه (۲) می‌توان دریافت که سیگنال داپلر دریافتی در رابطه (۴) یک سیگنال چیرپ غیرخطی می‌باشد. این سیگنال چیرپ با توجه به رابطه (۲) برای اهداف دارای بردهای متفاوت مشخصات مختلفی دارد. شکل ۳ نمونه سیگنال چیرپ ناشی از یک هدف نقطه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمونه سیگنال چیرپ ناشی از یک هدف نقطه‌ای

ارائه شده و روشی نوین برای موقعیت یابی چند هدف متحرک بیان گردیده است.

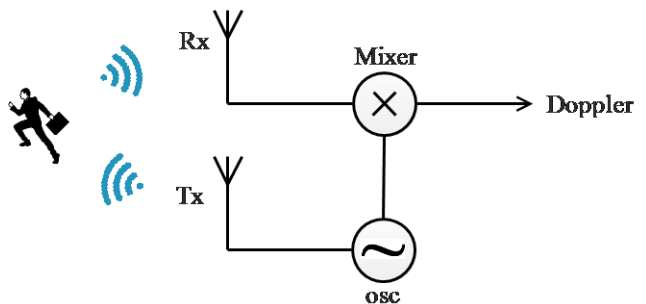
در این مقاله با ایده گرفتن از رادار دهانه ترکیبی، هدف تصویربرداری از محیط با استفاده از سنسور آشکارساز حرکت مبتنی بر اثر داپلر با استفاده از حرکت چرخشی می‌باشد. در بخش ۲ مقاله به بررسی هندسه و روابط ریاضی موجود پرداخته می‌شود. در بخش ۳ روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. بخش ۴ و ۵ شبیه‌سازی‌های انجام شده و سیستم پیاده‌سازی شده به همراه نتایج آن‌ها را شرح می‌دهد. و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

۲- بررسی هندسه و روابط

به طور کلی ماژول‌های آشکارساز حرکت مبتنی بر اثر داپلر دارای یک اسیلاتور برای ارسال یک موج تک تون، آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده و یک ضرب کننده برای تشکیل سیگنال داپلر می‌باشد. شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی سنسور آشکارساز حرکت را نشان می‌دهد. بنابراین سیگنال ارسالی سنسور آشکارساز حرکت را می‌توان به صورت رابطه (۱) نشان داد.

$$S_T(t) = A_T \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

در رابطه (۱) f_c فرکانس ارسالی و A_T دامنه سیگنال ارسالی می‌باشد.

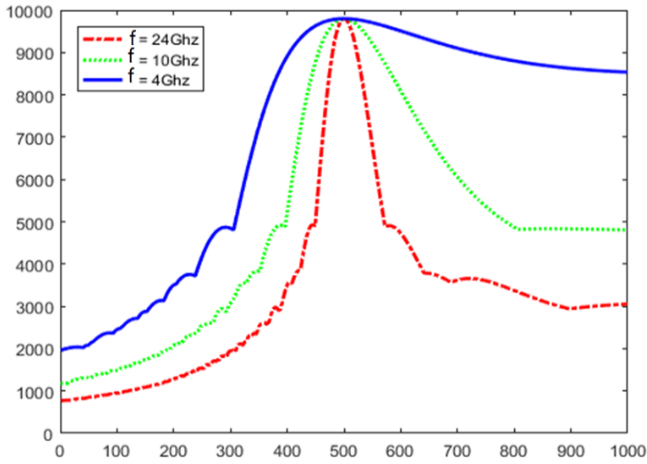


شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی سنسور آشکارساز حرکت

از سنسور آشکارساز حرکت مبتنی بر پدیده‌ی داپلر در ساختار شکل ۲ استفاده می‌شود بنابراین برای محاسبه سیگنال بازگشتی از هدف با توجه به شکل ۲ فاصله رادار و هدف محاسبه می‌شود. هدف در نقطه $(r_n, \theta_n, 0)$ در مختصات استوانه‌ای قرار داشته و سنسور بر روی یک دایره در ارتفاع h در حال چرخش است.

با فرض اینکه سنسور (یا آنتن) در موقعیت $(r_0, \omega t, h)$ قرار داشته باشد و با توجه به شکل ۲ داریم:

$$R(t) = \sqrt{h^2 + r_a^2 + r_n^2 + 2r_a r_n \cos(\omega t - \theta_n)} \quad (2)$$



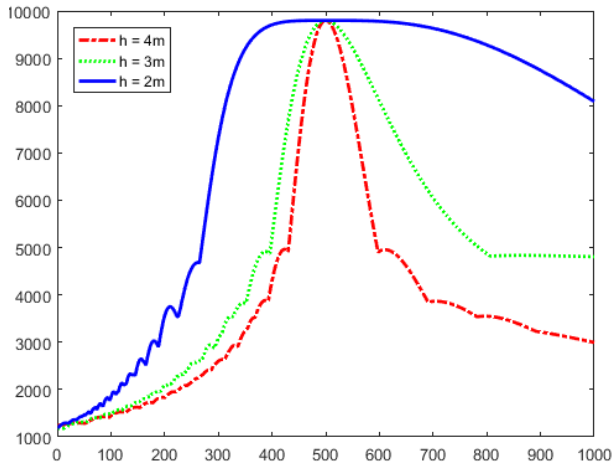
شکل ۴ PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای سه فرکانس ۴ و ۱۰ و ۲۴ گیگاهرتز

۳-۲- ارتفاع سیستم

همان‌طور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود ارتفاع سیستم باعث افزایش میزان R می‌شود و با توجه به رابطه (۴) افزایش R باعث افزایش پهنای باند سیگنال دریافتی می‌شود بنابراین افزایش ارتفاع یک عامل بهبود دهنده خواهد بود.

PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای ارتفاع‌های ۲ و ۳ و ۴ متری بررسی گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است.

در این بررسی پارامترها $r_a = 1$ ، $\theta_{beam} = 80^\circ$ ، $\omega = 2\pi \text{ rad/sec}$ و $f_c = 10 \text{ GHz}$ فرض گردیده است.



شکل ۵ PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای سه ارتفاع ۲ و ۳ و ۴ متری

۳-۳- طول بازوی آنتن

توضیحات داده شده در مورد ارتفاع سیستم در مورد طول بازوی چرخش نیز صادق است و اثر تغییرات طول بازوی آنتن در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳- روش پیشنهادی

با توجه به این که اهداف با بردهای مختلف چیرپ‌های مختلفی را تولید می‌کنند ایده‌ی استفاده از فیلتر منطبق برای شناسایی اهداف مطرح می‌گردد.

در این روش تعدادی سیگنال برای بردهای مختلف با استفاده از رابطه (۴) تولید می‌گردد و فیلترهای منطبق برای بردهای مختلف به دست می‌آیند.

در ادامه سیگنال دریافتی از فیلترهای منطبق عبور کرده و اهداف آشکارسازی می‌شوند. در خروجی فیلترهای منطبق وجود پیک نشان دهنده وجود هدف در برد مورد نظر و موقعیت پیک نشان‌دهنده زاویه قرارگیری هدف نسبت به لحظه شروع حرکت سنسور می‌باشد.

برای بررسی تاثیر عوامل مختلف در تصویر ساخته شده تابع نقطه گستر (PSF) در راستای برد برای یک هدف نقطه‌ای که در برد ۵ متری قرار دارد را به دست می‌آوریم. برای این امر فاصله بین r_a تا ۱۰ متری را به ۱۰۰۰ سلول برد تقسیم کرده و برای هر کدام سیگنال دریافتی را شبیه‌سازی می‌کنیم.

عواملی که در این جا مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: فرکانس ارسالی، ارتفاع سیستم، پهنای باند آنتن در راستای سمت و طول بازوی چرخش.

۳-۱- فرکانس ارسالی

با توجه به رابطه (۵) که فرکانس داپلر را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که هر چه فرکانس ارسالی بیشتر باشد پهنای باند داپلر بیشتر است بنابراین باید انتظار عملکرد بهتری را در فرکانس ارسالی بیشتر داشت. در رابطه (۵) میزان نشان دهنده فرکانس ارسالی، f_d فرکانس داپلر دریافتی، c سرعت نور و $v \cos \theta$ سرعت نسبی بین هدف و گیرنده می‌باشد.

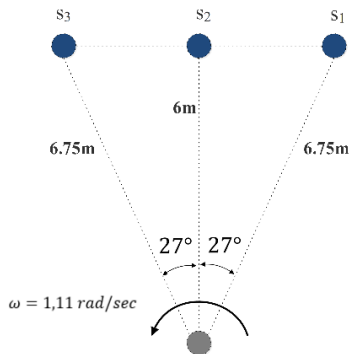
$$f_d = 2 \left(\frac{f_t}{c} \right) v \cos \theta \quad (5)$$

PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای فرکانس‌های ۴ و ۱۰ و ۲۴ گیگاهرتز بررسی گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این بررسی پارامترها $r_a = 1$ ، $h = 3$ ، $\theta_{beam} = 80^\circ$ ، و $\omega = 2\pi \text{ rad/se}$ فرض گردیده است.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش اهداف در بردها و زوایای مختلف در نظر گرفته شده‌اند و سپس سیگنال بازگشتی از این اهداف شبیه‌سازی شده است. در اینجا با شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی بررسی می‌شود. برای بررسی عملکرد در راستای برد و سمت سه هدف در هندسه زیر قرار گرفته‌اند. اختلاف زاویه سه هدف ۲۷ درجه می‌باشد. شکل ۸ آرایش اهداف در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.



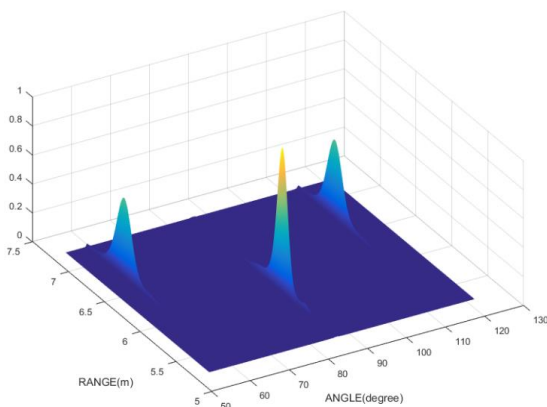
شکل ۸ آرایش اهداف در نظر گرفته شده

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

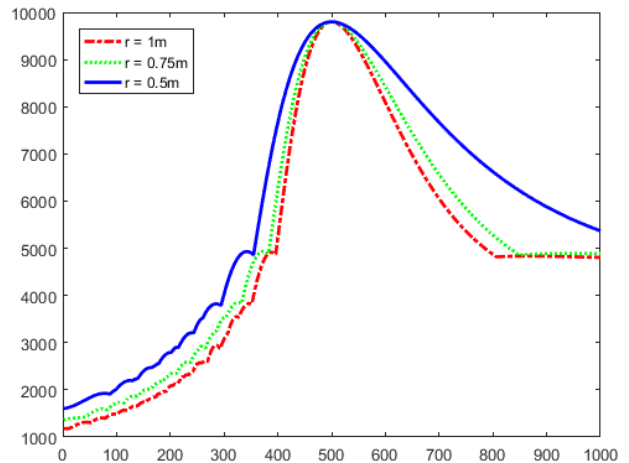
10.525Ghz	فرکانس ارسالی (f_c)
80°	پهنای بیم در راستای آزیموت (θ_{beam})
4.5m	ارتفاع سیستم (h)
1m	شعاع محور چرخش (r_a)
1.1 rad/sec	سرعت زاویه‌ای (ω)

نتیجه این شبیه‌سازی پس از آستانه‌گیری در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ نتیجه شبیه‌سازی صورت گرفته

در این بررسی پارامترها $h = 3m$ ، $\theta_{beam} = 80^\circ$ ، $\omega = 2\pi \text{ rad/sec}$ و $f_c = 10\text{Ghz}$ فرض گردیده است.



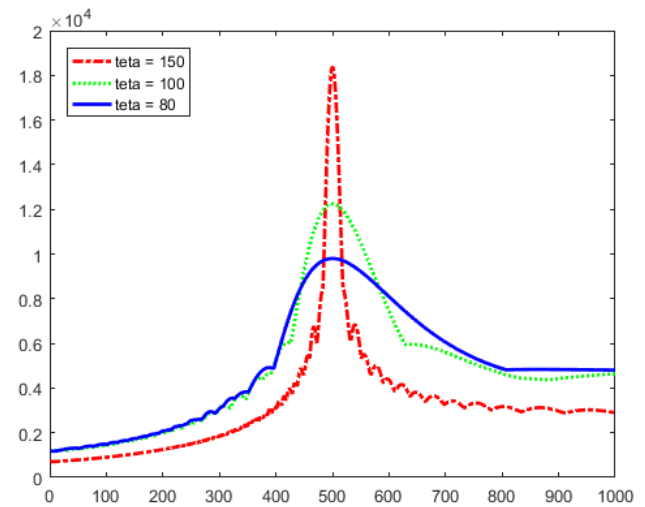
شکل ۶ PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای سه شعاع چرخش ۰/۵ و ۰/۷۵ و ۱ متری

۴-۳- پهنای بیم آنتن در راستای آزیموت

با استفاده از رابطه (۲) می‌توان رابطه (۶) که سرعت نسبی بین سنسور و هدف را به دست آورد. از رابطه (۶) این نتیجه حاصل می‌گردد که هدف در لحظه ورود به بیم آنتن بیشترین سرعت را دارد حال هر چه این زاویه بیشتر باشد فرکانس داپلر بیشتر می‌گردد که بهبود عملکرد را در پی خواهد داشت.

$$v(t) = \frac{r_a r_n \omega \sin(\omega t + \theta_n)}{\sqrt{h^2 + r_a^2 + r_n^2 - 2r_a r_n \cos(\omega t + \theta_n)}} \quad (6)$$

PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای چند پهنای بیم مختلف بررسی گردید که در شکل ۷ نشان داده شده است.



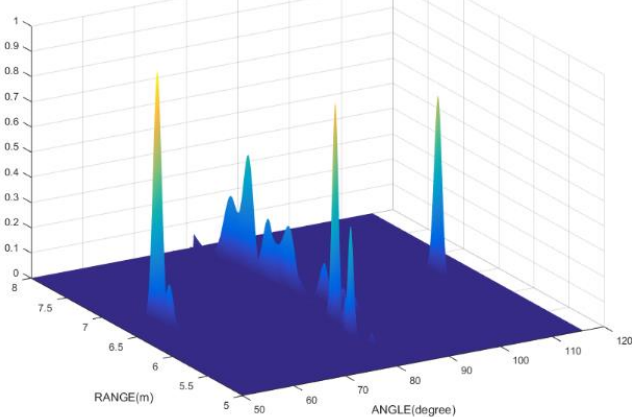
شکل ۷ PSF در راستای برد ناشی از هدف نقطه‌ای در برد ۵ متری برای سه پهنای بیم ۸۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه

برای تست و بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی سه هدف مشابه با هندسه شبیه سازی شده با سه رفلکتور ساخته شد و سیستم با همان مشخصات موجود در شبیه‌سازی راه اندازی گردید. هندسه پیاده‌سازی شده در شکل ۱۱ آرایش اهداف و هندسه پیاده سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۱۱ آرایش اهداف و هندسه پیاده سازی شده

پس از این متناسب با سرعت چرخش و پارامترهای مورد استفاده رفرنس‌های بردهای مختلف ساخته شد و شکل ۱۲ نتیجه حاصله را پس از پردازش و آستانه‌گیری نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده و مقایسه با پارامترهای واقعی در جدول ۳ نشان داده شده است. به دلیل عدم محاسبه دقیق زاویه هدف از لحظه چرخش زاویه نسبی بین اهداف به عنوان پارامتر برای بررسی صحت در راستای سمت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲ نتیجه حاصله از اهداف در هندسه پیاده سازی شده

جدول ۳ بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی

خطا	نتیجه به دست آمده	مقدار واقعی	پارامتر
۴/۴%	۷	۶/۷	برد هدف اول
۳/۳%	۶/۲	۶	برد هدف دوم
۴/۴%	۷	۶/۷	برد هدف سوم
۱/۸%	۲۶/۵	۲۷	زاویه بین هدف اول و دوم
۳/۸%	۲۶	۲۷	زاویه بین هدف دوم و سوم

باتوجه به شکل ۹ می‌توان به این نکته نیز دریافت که PSF برای اهداف در بردها مختلف متفاوت است و از طرفی PSF در راستای سمت از دقت بالایی برخوردار است.

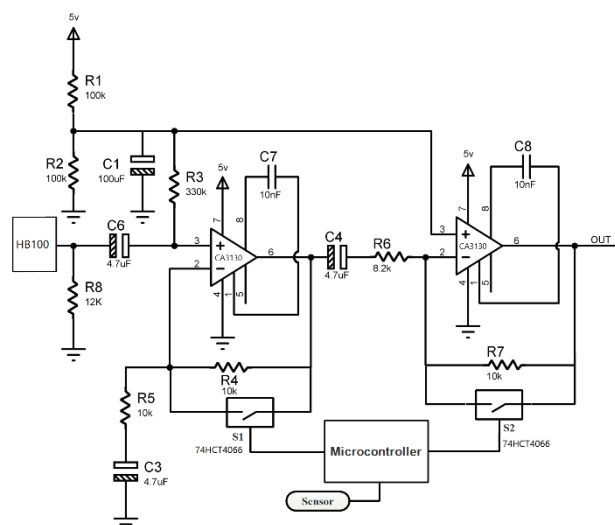
۵- پیاده سازی سخت افزاری

پیاده سازی با استفاده از ماژول آشکارساز حرکت HB100 انجام گرفت. در این کار برای چرخش از یک موتور DC استفاده شد. یک برد الکترونیکی برای کنترل سرعت موتور و یک برد دیگر برای شناسایی و تقویت سیگنال دریافتی حاصل از یک دور چرخش موتور طراحی و پیاده‌سازی شد. در جدول ۲ مشخصات ماژول HB100 بیان شده است.

جدول ۲ مشخصات ماژول HB100

پارامتر	معمول
فرکانس کاری	10.525Ghz
پهنای بیم آنتن در راستای سمت (3db)	80°
پهنای بیم آنتن در راستای ارتفاع (3db)	40°
ولتاژ تغذیه	5v
جریان مصرفی	30mA
وزن	8gm

برای تقویت کننده از مدار پیشنهادی موجود در دیتاشیت HB100 استفاده گردید با این تفاوت که برای نمونه برداری از یک دور بر روی مدار فیدبک تقویت کننده یک سویچ الکترونیکی قرار گرفت که جهت تقویت و عدم تقویت استفاده گردید کنترل این سویچ با استفاده سنسور مجاورتی^۹ و یک میکروکنترلر انجام گردید. دلیل استفاده از سویچ ثابت نگه داشتن سطح ولتاژ DC خروجی می‌باشد که برای نمونه برداری از سیگنال امری لازم است. شکل ۱۰ شماتیک مدار تقویت کننده سیگنال دریافتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ شماتیک مدار تقویت کننده سیگنال دریافتی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از یک سیستم با محدودیت‌های زیاد تصویربرداری انجام گردید. یکی از مهمترین عوامل در تصاویر رادار دهانه ترکیبی پهنای باند ارسالی است. در این سیستم هیچ پهنای باند ارسالی وجود ندارد و این مهم‌ترین مزیت این سیستم می‌باشد که بدون پهنای اند تصویربرداری را انجام می‌دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و پیاده سازی می‌توان به این نکته اشاره کرد که PSF در راستای سمت عملکرد مناسبی دارد و برای بهبود عملکرد PSF در راستای برد می‌توان از تاثیر پارامترهای بیان شده استفاده کرد. در مقاله تاثیر پارامترهای مختلف فرکانس ارسالی، زاویه پترن آنتن در راستای سمت، شعاع چرخش و ارتفاع بررسی گردید.

مراجع

- [1] H. Klausing, N. Bartsch, and C. Boesswetter, "A MM-Wave SAR-Design for Helicopter Application (ROSAR)," in *Microwave Conference, 1986. 16th European*, 1986, pp. 317-328: IEEE.
- [2] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, 2013.
- [3] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing*. New York: Wiley, 1999.
- [4] B. Sun, J. Chen, and Z. Qiao, "Outer circular synthetic aperture radar imaging based on Maxwell's equations," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 6, no. 1, p. 063547, 2012.
- [5] ثمره هاشمی، سید روح الله، سیدین، سید علیرضا، "تصویرسازی سریع در رادار دهانه ترکیبی نواری چرخشی،" رادار، ۲۰۱۵.
- [6] ثمره هاشمی، سید روح الله، سیدین، سید علیرضا، "تصویرسازی بر مبنای مدل در رادار دهانه ترکیبی نواری گردشی زمین پایه،" رادار، ۲۰۱۵.
- [7] V. C. Nguyen and D. K. Dinh, "Length and speed detection using microwave motion sensor," in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 371-376: IEEE.
- [8] X. Bao, Y. Zhan, C. Xu, K. Hu, C. Zheng, and Y. Wang, "A novel dual microwave Doppler radar based vehicle detection sensor for parking lot occupancy detection," *IEICE Electronics Express*, vol. 14, no. 1, pp. 20161087-20161087, 2017.
- [9] D. K. P. Tan, M. Lesturgie, H. Sun, and Y. Lu, "Moving target localization using dual-frequency continuous wave radar for urban sensing applications," in *Radar Conference-Surveillance for a Safer World, 2009. RADAR. International*, 2009, pp. 1-6: IEEE.

- [10] Y. Zhang, M. Amin, and F. Ahmad, "A novel approach for multiple moving target localization using dual-frequency radars and time-frequency distributions," in *Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on*, 2007, pp. 1817-1821: IEEE.
- [11] Y. Zhang, M. Amin, and F. Ahmad, "Time-frequency analysis for the localization of multiple moving targets using dual-frequency radars," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 777-780, 2008.
- [12] J. Huang, Y. Zhang, and S. Luo, "A Simple Estimator for Localization of Moving Targets Using Dual-Frequency Radar With Minimum System Architecture," *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, 2018.
- [13] M. Amin, P. Zeman, P. Setlur, and F. Ahmad, "Moving target localization for indoor imaging using dual frequency CW radars," in *Sensor Array and Multichannel Processing, 2006. Fourth IEEE Workshop on*, 2006, pp. 367-371: IEEE.

زیر نویس ها

- ¹ Doppler effect
- ² Synthetic Aperture Radar (SAR)
- ³ ROSAR
- ⁴ Point Spread Function
- ⁵ Proximity sensor