

## طراحی و ساخت رادار دهانه ترکیبی به کمک FPGA با تاکید بر طراحی سخت افزار

سینا سالاری<sup>۱</sup>، سید علیرضا سیدین<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات سیستم دانشگاه فردوسی مشهد [sinasalari@gmail.com](mailto:sinasalari@gmail.com)

۲- دانشیار گروه برق دانشکده ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد [seyedin@um.ac.ir](mailto:seyedin@um.ac.ir)

### خلاصه

تصویر برداری از زمین سال‌ها توسط دوربین‌های نوری صورت گرفته‌است، این دوربین‌ها رزولوشن مناسبی در اختیار کاربران قرار می‌دهند اما استفاده از آن‌ها صرفاً در محیط‌هایی با نور مناسب و فاقد مزاحم‌های محیطی همچون مه و ابر امکان پذیر است، به علاوه داده‌های استخراج شده از این دوربین‌ها دارای اطلاعات محدود از محیط تصویر برداری شده‌است. بر همین اساس از اواسط قرن بیستم کارهای تحقیقاتی به منظور ساخت سیستمی در جهت غلبه بر این مشکلات آغاز شد که نهایتاً منجر به تولید اولین نمونه از رادار دهانه ترکیبی به صورت آزمایشگاهی در سال ۱۹۵۱ گردید. رادار دهانه ترکیبی امکان کار در هر شرایط جوی را دارد و عوامل محیطی مانند مه، دود و کمبود نور محیط، اثری در تصاویر تولید شده توسط این رادار ندارند به علاوه آنکه به کمک رادار دهانه ترکیبی امکان استخراج اطلاعاتی همچون جنس مواد تصویر برداری شده و ایجاد تصاویر سه بعدی از محیط وجود دارد. مقاله پیش رو مراحل ساخت اولین رادار دهانه ترکیبی کشور را شرح می‌دهد. رادار ساخته شده از نظر سخت افزاری از نوع رادار موج پیوسته می‌باشد و پردازش اطلاعات دریافتی در آن توسط میکروپروسسور FPGA صورت می‌گیرد که استفاده از پردازنده جانبی موجب انعطاف پذیری بیشتر سیستم می‌شود. در این مقاله تمرکز بر روی بخش سخت افزاری است و به پردازش‌های انجام شده در پردازنده به صورت خلاصه اشاره شده است.

**کلمات کلیدی:** رادار دهانه ترکیبی، ساخت رادار، پیاده سازی سخت افزاری رادار دهانه ترکیبی

### ۱. مقدمه

تلاش برای ساخت سیستمی به منظور تصویر برداری از سطح زمین در هر شرایط آب و هوایی از اواسط قرن بیستم آغاز شد. در ابتدا هدف از ساخت اینچنین سیستمی، استفاده از آن در صنایع نظامی و شناسایی مناطق هدف بود. به این ترتیب، در سال 1951 اولین نسل از رادار دهانه ترکیبی (SAR<sup>۲</sup>) ساخته شد. SAR قادر به تصویر برداری از مناطق پوشیده از ابر، مه و دود، و یا محیط‌های تاریک، می‌باشد. این رادار، گرچه در ابتدا، تنها در صنایع نظامی مورد استفاده بود ولی با گذشت زمان و توسعه الگوریتم‌های آن، مورد توجه دیگر صنایع نیز قرار گرفت [1].

<sup>1</sup> Corresponding author: Sina Salari  
Email: [sinasalari@gmail.com](mailto:sinasalari@gmail.com)

<sup>2</sup> Synthetic aperture Radar

امروزه SAR در طیف وسیعی از کاربردها، از جمله زمین شناسی، باستان شناسی، تهیه تصاویر سه بعدی از سطح زمین، کشف معدن و ... کاربرد دارد به گونه‌ای که اکنون، صدها ماهواره و هواپیمای بدون سرنشین با استفاده از این تکنولوژی، مشغول جمع آوری اطلاعات از سطح زمین هستند و توسعه‌ی این رادار مورد توجه بسیاری از صنایع و کشورها است [1].

کاربردهای فراوان SAR، منجر به توسعه‌ی روز افزون این تکنولوژی در برخی از کشورها از جمله امریکا، فرانسه، روسیه و انگلیس شده است اما با وجود نیاز فراوان کشورمان به چنین تکنولوژی‌ای، هنوز موردی از ساخت SAR در کشور گزارش نشده است. مواردی مانند تولید شکل موج، منطبق بر نیازهای سیستم، طراحی سخت افزار جهت ارسال و دریافت سیگنال و تجزیه و تحلیل اطلاعات سیگنال بازگشتی به نحوی که امکان استخراج اطلاعات مفید جهت تصویر سازی مهیا شود از مواردی است که در ساخت رادار دهانه ترکیبی مورد توجه قرار می‌گیرد.

در ادامه در بخش دوم به معرفی نحوه عملکرد SAR اشاره شده، سپس در بخش سوم سیستم کلی از SAR آورده شده است، بخش چهارم به پردازش‌های مورد نیاز بر روی سیگنال اشاره می‌کند، طراحی سیستم براساس مشخصات مورد انتظار رادار صورت می‌گیرد بر همین اساس بخش پنجم به شرح مشخصات کلان سیستم می‌پردازد، براساس محاسبات انجام شده، در بخش ششم مراحل ساخت سیستم بیان شده است و نهایتاً در بخش هفتم نتایج نشان داده می‌شود.

## ۲. معرفی رادار SAR

رادار دهانه مصنوعی<sup>۳</sup> (SAR) راداری است که جهت تهیه تصاویر سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویر تهیه‌شده به وسیله این رادار تصاویری سیاه و سفید هستند که نشان‌دهنده نمودار RCS<sup>۴</sup> اهداف زمینی در دو یا سه بعد می‌باشند، بدین صورت که بخش‌های با قدرت بازتابش<sup>۵</sup> بالاتر در تصویر روشن تر خواهند بود. لازم است این رادار قابلیت تفکیک اهداف در دو (سه) بعد را داشته باشد. در بعد فاصله (برد<sup>۶</sup>) مانند رادارهای معمولی با ارسال یک سیگنال فرکانس بالا و پردازش سیگنال دریافتی، می‌توان اهداف را از هم تفکیک نمود [2].

قدرت تفکیک در بعد عمود بر برد<sup>۷</sup>، در رادارهای معمولی به طول آنتن وابسته است و رسیدن به دقت لازم گاهی از نظر عملی ممکن نیست؛ اما در رادار دهانه مصنوعی با حرکت رادار نسبت به صحنه مورد تصویربرداری، یک آنتن با طول زیاد شبیه‌سازی<sup>۸</sup> می‌شود؛ بنابراین می‌توان به قدرت تفکیک لازم دست یافت. از دید پردازش، با حرکت رادار سرعت نسبی بین رادار و اهداف در موقعیت‌های مختلف متفاوت بوده بنابراین سیگنال بازگشتی از هر هدف فرکانس دوپلر<sup>۹</sup> متفاوتی خواهد داشت که همین باعث تفکیک آن‌ها می‌شود. (شکل ۱)

<sup>3</sup> Synthetic aperture radar

<sup>4</sup> Radar Cross Section profile

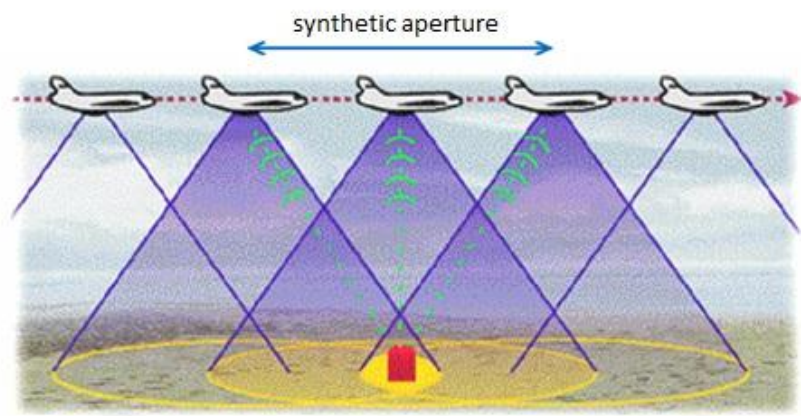
<sup>5</sup> reflectivity

<sup>6</sup> Range

<sup>7</sup> Cross-range

<sup>8</sup> Synthesis

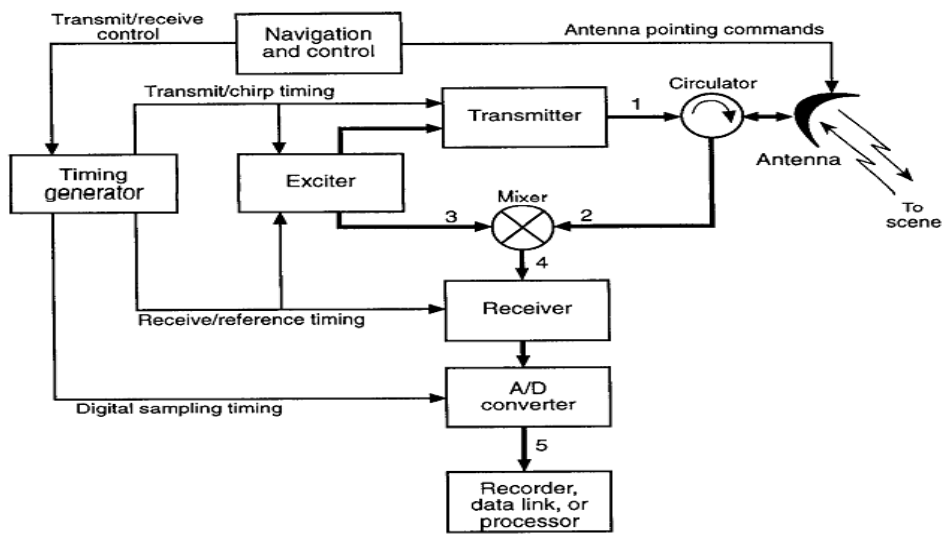
<sup>9</sup> Doppler Frequency



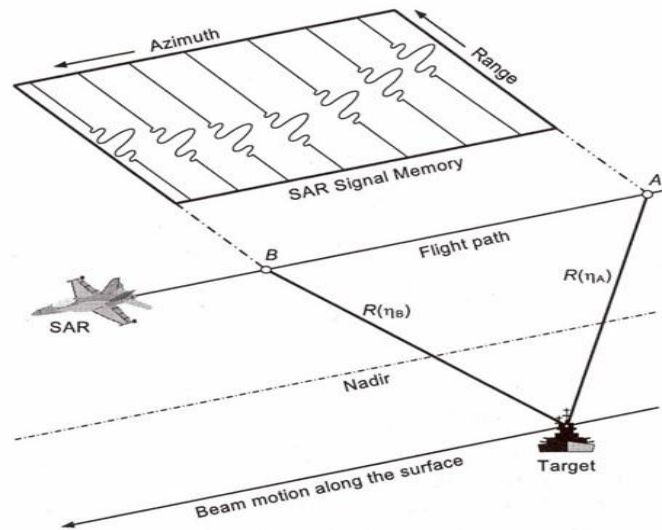
شکل 1- رادار روزنه مصنوعی

۳. سیستم یک SAR

شکل ۲ سیستم عمومی یک SAR را در قالب یک دیاگرام بلوکی نمایش می‌دهد. پالس‌های تولیدی در فرستنده پس از ارسال و دریافت به وسیله آنتن، به باندهای میانی (IF) منتقل و پس از پردازش‌های گیرنده به وسیله A/D نمونه‌برداری می‌شوند [3]. پالس‌های باند پایه نمونه‌برداری شده جهت تشکیل تصویر به ترتیب در سطرهای یک ماتریس موسوم به ماتریس داده خام ذخیره می‌شوند [4]. شکل ۳ چگونگی ذخیره شدن پالس‌های بازگشتی در موقعیت‌های مختلف رادار و تشکیل ماتریس داده را نشان می‌دهد. با پردازش این ماتریس تحت الگوریتم‌های مختلف، می‌توان به تصویر ناحیه مورد نظر دست یافت.



شکل ۲- سیستم عمومی یک رادار SAR



شکل ۳- ماتریس داده‌ی خام

#### ۴. پردازش سیگنال

#### ۱.۴ تفکیک اهداف در برد

به منظور فاصله‌یابی در رادار، از محاسبه تأخیر پالس برگشتی نسبت به پالس ارسالی استفاده می‌شود. برای مثال اگر تأخیر پالس برگشتی از هدف نسبت به پالس ارسالی برابر  $\tau$  باشد، فاصله هدف مورد نظر از رادار برابر  $\frac{c\tau}{2}$  خواهد بود که  $c$  سرعت نور است. برای تفکیک پالس‌های برگشتی دو هدف مجاور لازم است این پالس‌ها به اندازه کافی باریک باشند؛ بنابراین قدرت تفکیک در برد ( $\Delta R$ ) را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\Delta R = \frac{cT_p}{2} \quad (1)$$

که  $T_p$  پهنای پالس‌های ارسالی می‌باشد. برای داشتن قدرت تفکیک خوب باید پالس‌های باریک فرستاده شود [3]؛ (شکل ۴) اما این مسئله مستلزم داشتن توان قله<sup>۱۰</sup> بالا برای رسیدن به نسبت سیگنال به نویز<sup>۱۱</sup> (SNR) مطلوب می‌باشد که از نظر عملی دست یافتن به آن مشکل است.

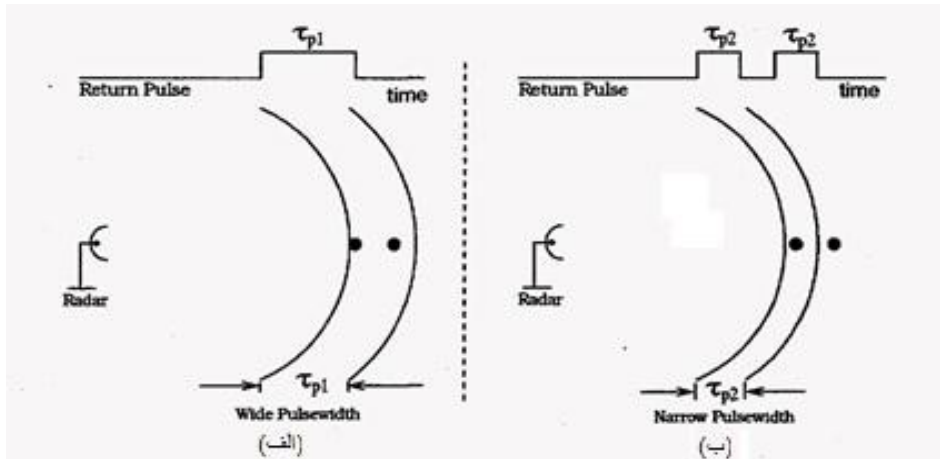
برای رفع این مشکل، از ارسال پالس‌های عریض با پهنای باند بالا استفاده می‌کنیم. یکی از معروف‌ترین این پالس‌ها، پالس با مدولاسیون خطی<sup>۱۲</sup> FM (LFM) است که به سیگنال «چیرپ»<sup>۱۳</sup> معروف است. در این سیگنال، فرکانس لحظه‌ای با گذشت زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد و پالس عریض‌تر، پهنای باند بیشتری خواهد داشت، بنابراین بر عکس حالت قبل با عریض‌تر شدن پالس، علاوه بر کاهش توان قله، قدرت تفکیک افزایش خواهد یافت [5].

<sup>10</sup> Peak power

<sup>11</sup> Signal to Noise Ratio

<sup>12</sup> Linear Frequency Modulation

<sup>13</sup> Chirp



شکل ۴- تفکیک در برد: (الف) ارسال پالس عریض و عدم تفکیک اهداف (ب) ارسال پالس باریک و تفکیک اهداف

هنگام دریافت پالس‌های برگشتی از اهداف نزدیک به هم، برای تفکیک اهداف، از تکنیک فشرده‌سازی پالس استفاده می‌شود (شکل ۵).

قدرت تفکیک پس از فشرده‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2)$$

که  $B$  پهنای باند پالس ارسالی و  $c$  سرعت موج می‌باشد.

یک سیگنال LFM رابطه‌ای به صورت زیر بر حسب زمان دارد:

$$s(t) = P(t)e^{j\pi\alpha t^2} \quad -\frac{T_p}{2} \leq t \leq \frac{T_p}{2} \quad (3)$$

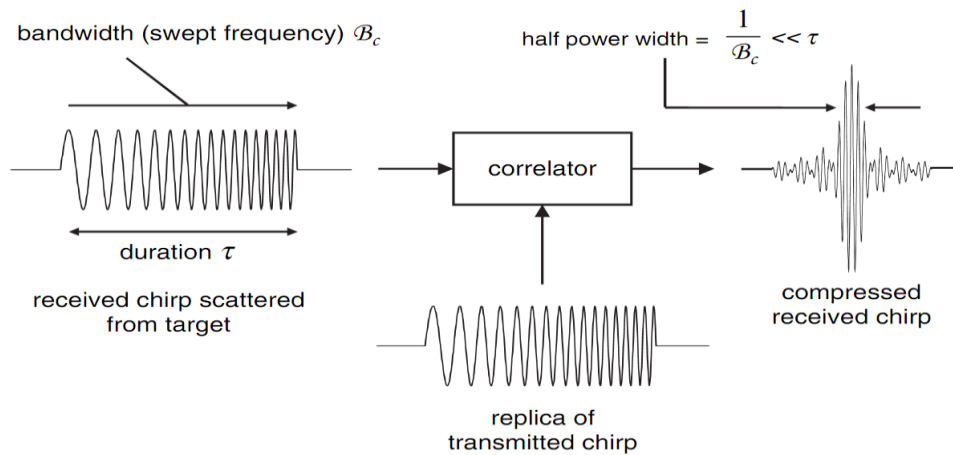
که  $P(t)$  پالس مربعی در زمان  $t$  با عرض  $T_p$  و  $\alpha$  نرخ افزایش فرکانس<sup>۱۴</sup> می‌باشد. فرکانس لحظه‌ای و پهنای باند این سیگنال را می‌توان به ترتیب با پارامترهای  $f(t)$  و  $B$  بیان کرد:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\pi\alpha t^2)}{dt} = \alpha t, \quad B = \alpha T_p \quad (4)$$

بنابراین در این حالت قدرت تفکیک به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2\alpha T_p} \quad (5)$$

<sup>14</sup> Chirp rate



شکل ۵- فشرده‌سازی سیگنال Chirp

#### ۲.۴ تفکیک اهداف در سمت

هندس سه بعدی رادار SAR را می‌توان با ترکیب برد زمینی و ارتفاع و تبدیل آن به برد مایل، به صورت دو بعدی (برد مایل و سمت) در نظر گرفت. شکل ۶ هندسه دو بعدی مسأله را نشان می‌دهد.

هدف نقطه‌ای در مختصات  $(R_0, 0)$  قرار دارد. سکوی حامل رادار روی محور  $y$  در جهت مثبت با سرعت ثابت  $V_p$  حرکت می‌کند. فرض می‌کنیم هدف در  $y = -\frac{L_s}{2}$  وارد پرتوی 3db رادار می‌شود و در  $y = \frac{L_s}{2}$  از پرتوی 3db خارج می‌شود. به فاصله  $L_s$ ، روزنه مصنوعی<sup>۱۵</sup> گفته می‌شود.

موقعیت رادار در لحظه  $\tau$  را به صورت  $y(\tau)$  در نظر می‌گیریم که  $\tau$  زمان مربوط به حرکت رادار (زمان کند<sup>۱۶</sup>) است؛ بنابراین:

$$y(\tau) = V_p \tau \quad (۶)$$

سیگنال ارسالی به سمت هدف را یک سیگنال پیوسته<sup>۱۷</sup> (CW) به صورت  $e^{j\omega_c t}$  در نظر می‌گیریم که  $\omega_c = 2\pi f_c$  و  $f_c$ ، فرکانس حامل و  $t$  زمان مربوط به حرکت موج (زمان تند<sup>۱۸</sup>) می‌باشد.

در این حالت سیگنال دریافتی هنگامی که رادار در موقعیت  $y(\tau)$  قرار دارد به صورت زیر خواهد بود:

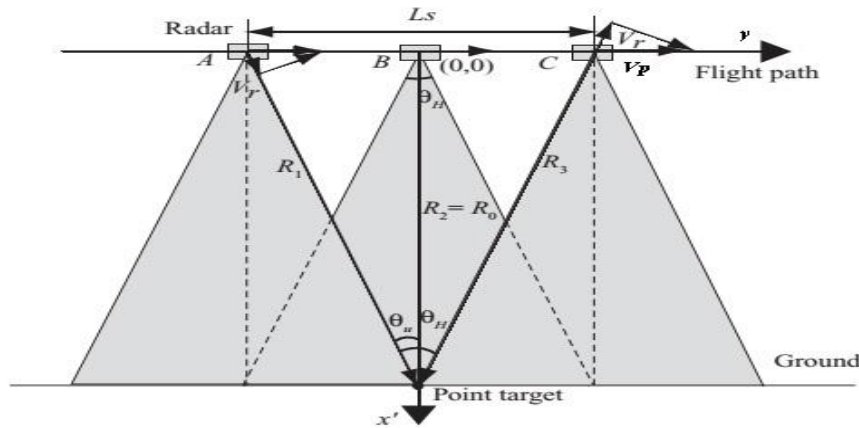
$$s(t) = e^{j\omega_c(t - \frac{2R(\tau)}{c})} \quad (۷)$$

<sup>15</sup> Synthetic aperture

<sup>16</sup> Slow time

<sup>17</sup> Continues Wave

<sup>18</sup> Fast time



شکل ۶- تغییر سرعت نسبی هدف و رادار و تشکیل سیگنال chirp در سمت

که  $\frac{2R(\tau)}{c}$  زمان تأخیر سیگنال می‌باشد. حال می‌توان سیگنال باند پایه دریافتی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$s_b(t) = s(t) \times e^{-j\omega_c t} = e^{-j\frac{2\omega_c}{c}R(\tau)} = e^{-j2kR(\tau)} \quad (8)$$

که  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  عدد موج<sup>۱۹</sup> و  $\lambda = \frac{c}{f_c}$  طول موج می‌باشد. فاصله هدف از رادار در زمان  $\tau$  به صورت زیر خواهد بود:

$$R(\tau) = \sqrt{R_0^2 + y(\tau)} = \sqrt{R_0^2 + V_p^2 \tau^2} \quad -\frac{T_s}{2} < \tau < \frac{T_s}{2} \quad (9)$$

که  $T_s$  زمان عبور از دهانه مصنوعی<sup>۲۰</sup> می‌باشد و داریم:

$$T_s = \frac{L_s}{V_p} \quad (10)$$

$R(\tau)$  را به شرط  $R_0 \gg \frac{L_s}{2}$  می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

$$R(\tau) = R_0 \sqrt{1 + \frac{V_p^2 \tau^2}{R_0^2}} \approx R_0 \left( 1 + \frac{V_p^2 \tau^2}{2R_0^2} \right) = R_0 + \frac{V_p^2 \tau^2}{2R_0} \quad (11)$$

در نتیجه:

<sup>19</sup> Wave number  
<sup>20</sup> Aperture time

$$s_b(t) = e^{-j2kR(\tau)} e^{-j\frac{2\pi V_p^2 \tau^2}{\lambda R_0}} \quad (12)$$

بنابراین سیگنال باند پایه دریافتی یک سیگنال LFM با نرخ  $\frac{2 V_p^2}{\lambda R_0} \left(\frac{\text{Hz}}{s}\right)$  و پهنای باند زیر خواهد بود:

$$B_\tau = \frac{2 V_p^2}{\lambda R_0} T_s = \frac{2 V_p^2 L_s}{\lambda R_0 V_p} = \frac{2 V_p L_s}{\lambda R_0} (\text{Hz}) \quad (13)$$

از طرفی داریم:

$$L_s = 2 R_0 \tan\left(\frac{\square_B}{2}\right), \quad \square_B \approx \frac{\lambda}{L_a} \quad (14)$$

که  $\square_B$  پهنای 3db پرتوی آنتن و  $L_a$  طول آنتن می‌باشد با فرض باریک بودن پرتوی آنتن می‌توان تقریب‌های زیر را انجام داد:

$$L_s = 2 R_0 \frac{\square_B}{2} = \frac{R_0 \lambda}{L_a} \quad (15)$$

با جایگذاری در رابطه ۱۳ خواهیم داشت:

$$B_\tau = 2 \frac{V_p}{L_a} \quad (16)$$

یعنی پهنای باند سیگنال در حوزه  $\tau$  (پهنای باند دوپلر) به سرعت حرکت سکو و طول آنتن وابسته است و فاصله هدف از رادار در این پهنای باند بی تأثیر است.

در مورد رادار پالسی، چون ارسال پالس به معنای نمونه‌برداری از سیگنال حوزه سمت می‌باشد، بنابراین نرخ ارسال پالس<sup>۲۱</sup> (PRF) باید به حدی باشد که اطلاعات حوزه سمت دچار خطای تداخل فرکانسی<sup>۲۲</sup> نگردد، یعنی باید:

$$\text{PRF} > B_\tau = \frac{2V_p}{L_a} \quad (17)$$

برای محاسبه قدرت تفکیک در سمت رابطه‌ای مشابه رابطه ۲ را داریم [6]:

$$\Delta y = \frac{V_p}{B_\tau} = \frac{L_a}{2} \quad (18)$$

یعنی قدرت تفکیک در سمت برابر نصف طول آنتن خواهد بود.

<sup>21</sup> Pulse Repetition Frequency  
<sup>22</sup> aliasing



## 5. مشخصات کلان سیستم

مشخصات فنی سیستم رادار مورد نظر در جدول ۱ ذکر شده است.

بر این اساس پارامترهای اصلی سیستم SAR طبق مشخصات فنی داده شده محاسبه می‌شوند. این پارامترها شامل فرکانس کاری سیستم، پهنای باند و عرض پالس ارسالی، طول و عرض آنتن، فرکانس تکرار پالس و توان فرستنده می‌باشند که به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

فرکانس حامل<sup>۲۳</sup>: با توجه به برد و ارتفاع سکوی حامل رادار ذکر شده در جدول ۱ و نیز ملاحظات عملی، فرکانس انتخاب شده 2.4GHz می‌باشد.

### جدول ۱- مشخصات فنی سیستم

مقدار	مشخصه	
تصویربرداری به شیوه نواری	مأموریت رادار	۱
۱0m	ارتفاع سکوی رادار	۲
1000m	برد مایل	۳
10 deg. to 30 deg.	زاویه برخورد	۴
$\leq -25\text{dB}$	سطح مقطع راداری معادل نویز	۵
3m	حد تفکیک در برد	۶
$\leq 3\text{m}$	حد تفکیک در سمت	
30 m	پهنای نوار	

پهنای باند: قدرت تفکیک در برد زمینی با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta x = \frac{c}{2B \sin(\beta)} \quad (19)$$

$\Delta x$  قدرت تفکیک برد زمینی،  $c$  سرعت نور،  $B$  پهنای باند و  $\beta$  زاویه انحراف از پای عمود می‌باشد. در نتیجه:

<sup>23</sup> Career frequency

$$B = \frac{c}{2\Delta R_g \sin(\beta)}$$

در اینجا کوچک‌ترین زاویه انحراف را در محاسبه وارد می‌کنیم:

$$B = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 3 \text{ m} \times \sin(30^\circ)} = 100 \text{ MHz}$$

مشخصات آنتن: با توجه به برد رادار (1 – 1.5 Km) و ابعاد نورافکنی در سمت (175 – 366 m) می‌توان

پهنای پرتو آنتن<sup>۲۴</sup> را محاسبه نمود:

$$\theta_{a1} \approx \frac{175}{1000} = 0.175 \text{ rad} = 10^\circ$$

$$\theta_{a2} \approx \frac{366}{1500} = 0.244 \text{ rad} = 14^\circ$$

توان فرستنده: بالاترین سیگنال به نویز قابل دستیابی در رادار SAR به دلیل پردازش هم‌دوس<sup>۲۵</sup> برابر است با:

$$SNR = \frac{P_{av} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_0 \cdot \Delta R}{2(4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot F \cdot L \cdot V_p \cdot \sin\beta} \quad (19)$$

$SNR$ : حداکثر نسبت سیگنال به نویز قابل دستیابی

$P_{av}$ : توان متوسط فرستنده

$G$ : بهره آنتن

$\lambda$ : طول موج

$\sigma_0$ : سطح مقطع راداری نرمالیزه سطح مورد تصویربرداری

$\Delta R$ : قدرت تفکیک در برد مایل

$R$ : برد

$k$ : ثابت بولتزمان  $(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{k})$

$T_0$ : دمای گیرنده

$F$ : فاکتور نویز گیرنده

$L$ : کل تلفات توان

<sup>24</sup> Antenna Beam Width

<sup>25</sup> Coherent

$V_p$  : سرعت سکو

$\beta$  : زاویه انحراف از پای عمود

سطح مقطع راداری معادل نویز در جدول ۱ برابر  $-25 \text{ db}$  ذکر شده است، و این مقدار، برابر  $\sigma_0$  ای است که به ازای آن SNR برابر ۱ ( $0 \text{ db}$ ) خواهد شد؛ بنابراین از رابطه ۱۹ می‌توان مقدار توان فرستنده را محاسبه نمود:

$$P_{av} = \frac{2(4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot F \cdot L \cdot V_p \cdot \sin\beta \cdot \text{SNR}}{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_0 \cdot \Delta R}$$

با در نظر گرفتن مقادیر زیر:

$$R=1000 \text{ m (maximum)}$$

$$k=1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$T_0=290^\circ \text{ K}$$

$$F=2$$

$$L=10$$

$$\beta = 60^\circ \text{ (maximum)}$$

$$G = \frac{26000}{\theta_e \theta_a} = \frac{26000}{10^\circ \times 14^\circ} = 180$$

$$\lambda=0.03 \text{ m}$$

$$\sigma_0 = -25 \text{ db} = 0.0032$$

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times 100 \text{ MHz}} = 1.5 \text{ m}$$

مقدار  $P_{av}$  برابر  $60 \text{ mW}$  به دست خواهد آمد. توان قله<sup>۲۶</sup> فرستنده را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_t = \frac{P_{av}}{f_p \times T_p}$$

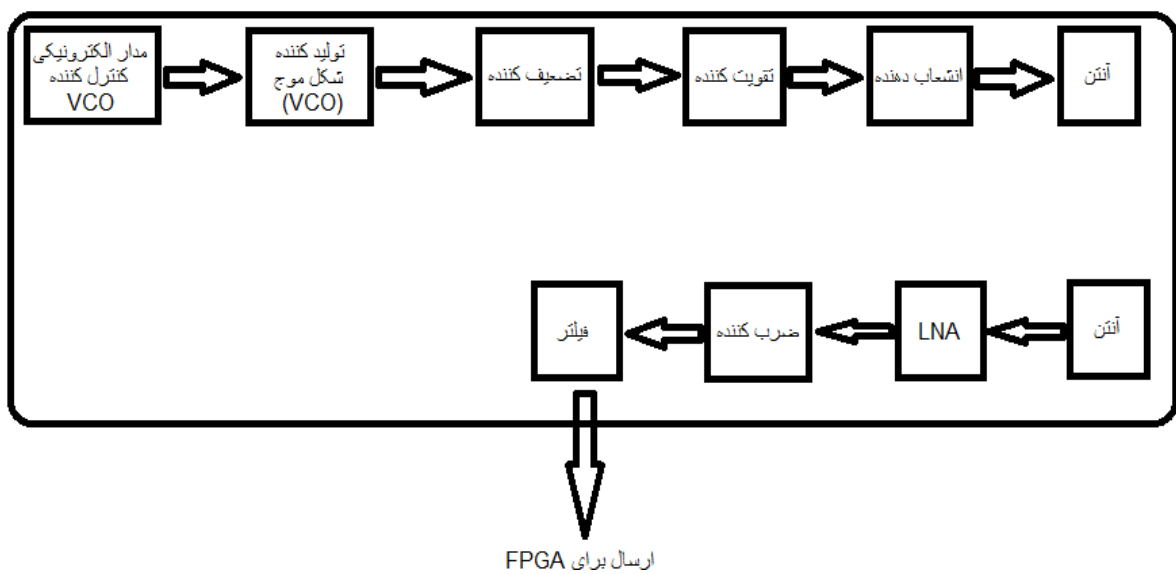
که  $f_p$  برابر PRF و  $T_p$  عرض پالس است. با فرض  $f_p = 250 \text{ Hz}$  داریم:

$$P_t = \frac{0.06 \text{ W}}{250 \text{ Hz} \times 200 \mu\text{s}} = 0.12 \text{ W}$$

<sup>26</sup> Peak Power

### 6. پیاده سازی رادار

رادار ساخته شده از نوع موج پیوسته می‌باشد و در آن از VCO به عنوان تولید کننده‌ی شکل موج استفاده شده‌است. در این رادار سعی بر آن بوده، با استفاده از حداقل هزینه ممکن راداری با خروجی قابل قبول ساخته شود بنابراین تلاش شده است به کمک کارهای نرم افزاری، کاستی‌های مربوط به سخت افزار تا حدود زیادی کاهش یابد. در شکل ۷ نمای کلی از بخش سخت افزار سیستم آورده شده است.



شکل ۷- نمای کلی سخت افزار رادار ساخته شده

### ۱.۶ تولید شکل موج مورد نیاز

موج مرجع در سیستم ساخته شده، Chirp است. به منظور ساخت شکل موج دو روش اصلی وجود دارد. روش اول استفاده از  $DDS^{27}$  است. DDS قطعه‌ای برنامه پذیر است که می‌تواند شکل موج‌هایی با دقت بالا تولید کند. اما از طرف دیگر موج تولید شده توسط DDS در باند پایه قرار دارد و به منظور استفاده از آن در باند مورد نظر باید از چند طبقه ضرب کننده استفاده شود البته با توجه به استفاده از FPGA در این پروژه امکان پیاده سازی نرم افزاری DDS در FPGA وجود دارد که در این صورت باید از  $DAC^{28}$  سرعت بالا در خروجی FPGA استفاده شود. روش دیگر تولید شکل موج Chirp استفاده از VCO است. مزیت استفاده از VCO امکان تولید شکل موج در باند میانی است و عیب آن عدم پایداری موج تولید شده‌است. باید دقت شود که SAR از فرکانس داپلر و تغییرات فاز جهت تولید تصویر استفاده می‌کند و عدم پایداری موج تولید شده ایجاد مشکلاتی در تصویر سازی خواهد نمود. با توجه به آنکه در اینجا هدف ساخت سیستمی نمونه است و کاهش هزینه‌های ساخت از اهداف کلی می‌باشد در پیاده‌سازی شکل موج از VCO استفاده شده است.

<sup>27</sup> Direct digital synthesizer

<sup>28</sup> Digital to Analog Converter

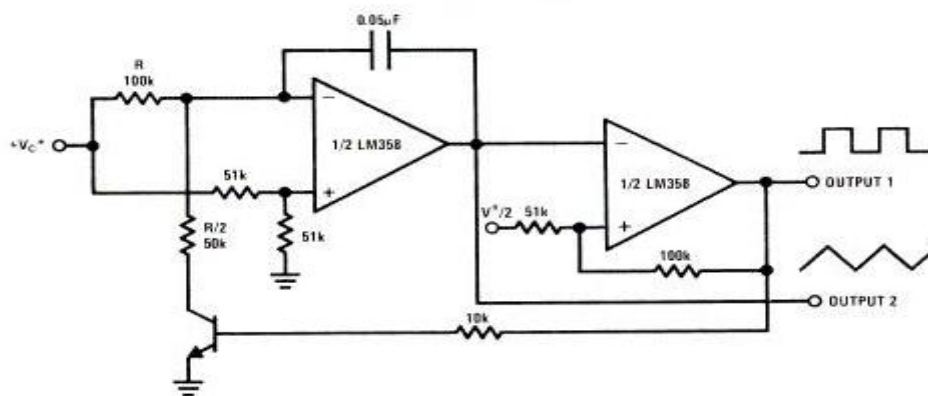
رادار ساخته شده باید در محیط شهری آزمایش گردد، بنابراین از باندهای آزاد به منظور تولید شکل موج استفاده شده است. فرکانس مرکزی استفاده شده 2.4GHZ می‌باشد و حداکثر توان خروجی 6dbm است. VCO مورد استفاده قادر به تولید موج‌هایی در فرکانس های بین ۲۳۱۵HZ تا 2536HZ می باشد که به دلیل جلوگیری از ایجاد اختلال در باندهای تجاری، تنها 100MHZ از این پهنای باند استفاده می‌شود. در شکل ۸ شماتیک یک VCO نمونه آورده شده است.

### ۲.۶ تقویت کننده ی سیگنال خروجی

از مزیت‌های استفاده از رادار موج پیوسته، امکان کاهش توان سیگنال خروجی و به طبع آن استفاده از تقویت کننده‌هایی با توان خروجی پایین تر است. در سیستم طراحی شده برد رادار یک کیلومتر در نظر گرفته شده است و با توجه به محاسبات صورت گرفته، لازم است سیگنال 15db تقویت شود. (با توجه به محدودیت توان ورودی به تقویت کننده، قبل از تقویت کننده از یک تضعیف کننده استفاده شده است)

### ۳.۶ انشعاب دهنده

در رادارهای موج پیوسته لازم است سیگنال دریافتی در سیگنال ارسالی ضرب شود، به همین دلیل در این رادارها معمولاً از قطعه‌ای به نام انشعاب دهنده (تصویر ۱) استفاده می‌شود. به کمک این قطعه، بخشی از سیگنال ارسالی وارد بخش گیرنده می‌شود و در سیگنال دریافتی گیرنده، ضرب می‌شود. انشعاب دهنده‌ی استفاده شده در این رادار موجب افت توان سیگنال ارسالی به اندازه ی 3db می‌شود.



شکل ۸- یک نمونه VCO



تصویر ۱- انشعاب دهنده

### ۴.۶ آنتن

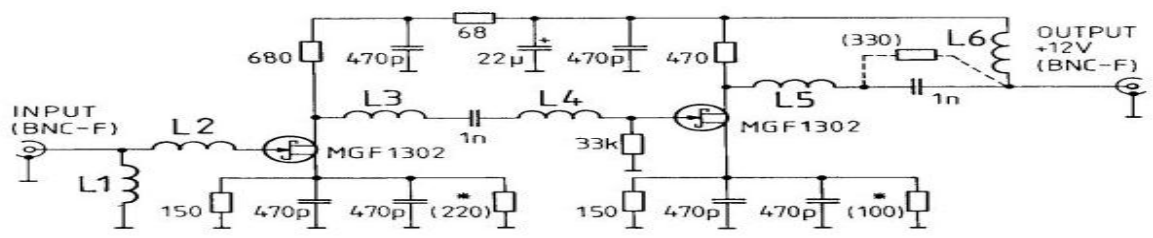
در این رادار از دو آنتن جهت ارسال و دریافت سیگنال‌ها استفاده شده است. استفاده از دو آنتن باعث بهبود ایزولاسیون بین دو بخش فرستنده و گیرنده می‌شود و این به معنای کاهش تداخل‌های ناخواسته در سیستم است. گین آنتن استفاده شده 24dbi است و زاویه تابش عمودی و افقی آن به ترتیب ۱۴ و ۱۰ درجه می‌باشد.

### LNA 5.6

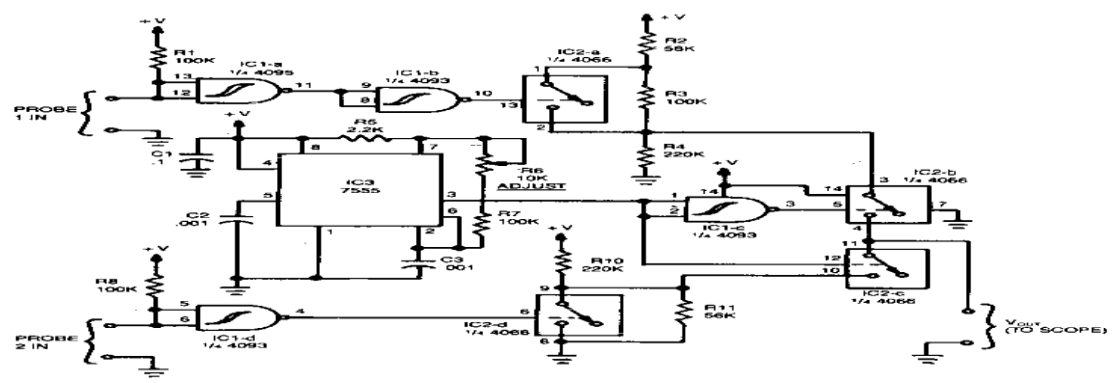
سیگنال بازتابش شده در آنتن گیرنده دارای توان بسیار پایینی می‌باشد بنابراین سیگنال دریافتی، از یک تقویت کننده نویز پایین عبور داده می‌شود تا به توان مورد نظر دست یابیم. تقویت کننده استفاده شده در این مرحله 15db سیگنال دریافتی را تقویت می‌کند. با توجه به آنکه تست نهایی سیستم بر روی زمین صورت گرفته است، میزان سیگنال‌های بازگشتی از نواحی اطراف آنتن دارای توان نسبتاً بالایی هستند و دلیل تقویت نسبتاً کم سیگنال دریافتی، جلوگیری از به اشباع رفتن قطعات و یا حتی ایجاد سیگنال با توان بالا در خروجی تقویت کننده و به دنبال آن صدمه دیدن دیگر قطعات در بخش گیرنده است. در شکل ۹ شماتیک یک LNA نمونه آمده است.

### ۶.۶ ضرب کننده

در رادار موج پیوسته اغلب، سیگنال دریافتی در سیگنال انشعابی از بخش فرستنده ضرب می‌شود. ضرب کننده این عملیات را، به صورت آنالوگ در بخش گیرنده، انجام می‌دهد. ضرب کننده استفاده شده در این سیستم موجب کاهش توان سیگنال به میزان 6.1db می‌شود. (شکل ۱۰ شماتیک ضرب کننده نمونه)



شکل ۹- شماتیک LNA نمونه



شکل ۱۰ - شماتیک ضرب کننده نمونه

۷.۶ فیلتر

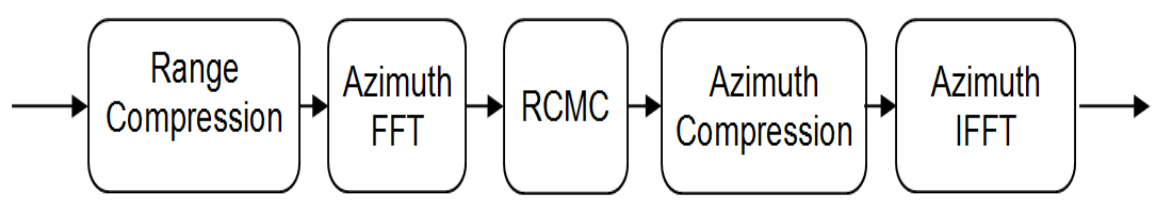
سیگنال خارج شده از ضرب کننده دارای مقادیر زیادی نویز و سیگنال‌های تداخلی است بنابراین به منظور حذف این سیگنال‌های مزاحم از فیلتر استفاده شده است. با توجه به اینکه ضرب دو سیگنال ارسالی و دریافتی در بخش قبل موجب انتقال سیگنال به باند پایه می شود و این مسئله موجب از بین رفتن دشواری‌های طراحی مدارات فرکانس بالا می‌گردد، این فیلتر به صورت الکترونیکی طراحی و ساخته شد.

۸.۶ ارسال اطلاعات به پردازنده

پس از فیلتر شدن سیگنال بازتابش، به منظور استخراج اطلاعات، از سیگنال نمونه برداری می‌شود و این نمونه‌ها به FPGA ارسال می‌گردند.

۹.۶ پردازش های صورت گرفته در FPGA

شکل ۱۱ پردازش‌های صورت گرفته در FPGA و ترتیب اعمال آن‌ها را نشان می‌دهد.



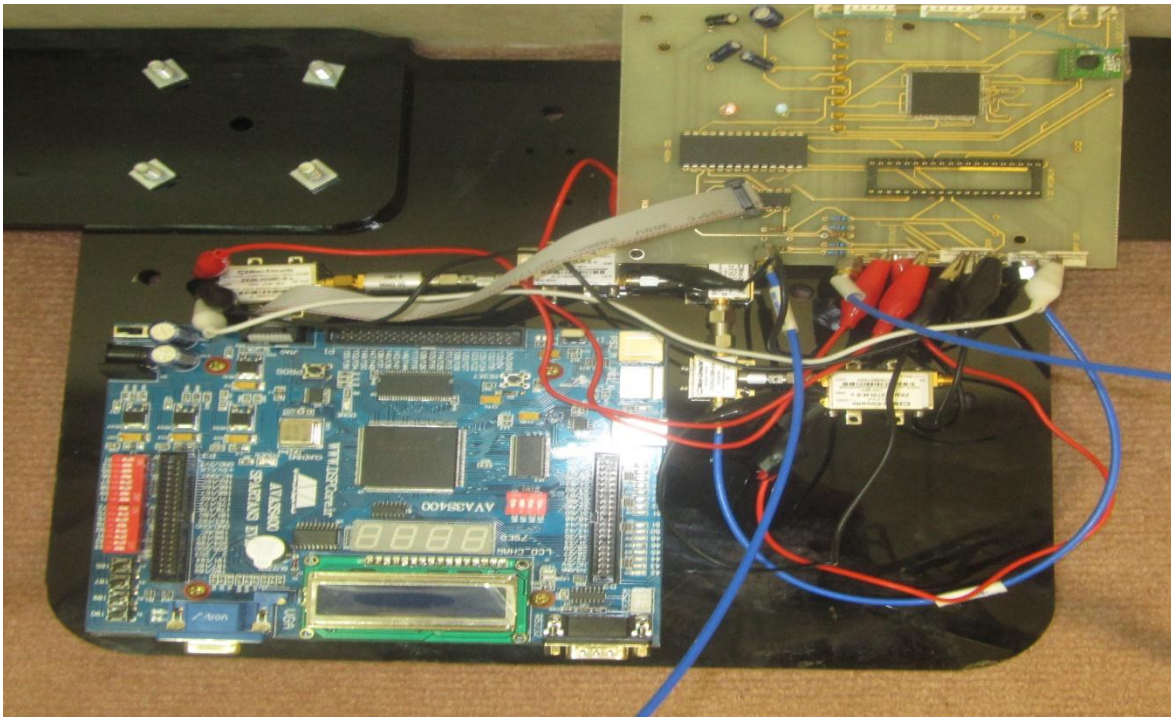
شکل ۱۱ - پردازش های مورد نیاز به منظور تشکیل تصویر در FPGA

### ۹.۵ نمای کلی سیستم

در تصویر ۲ نمای کلی سیستم آورده شده است.



تصویر ۲- نمای کلی سیستم

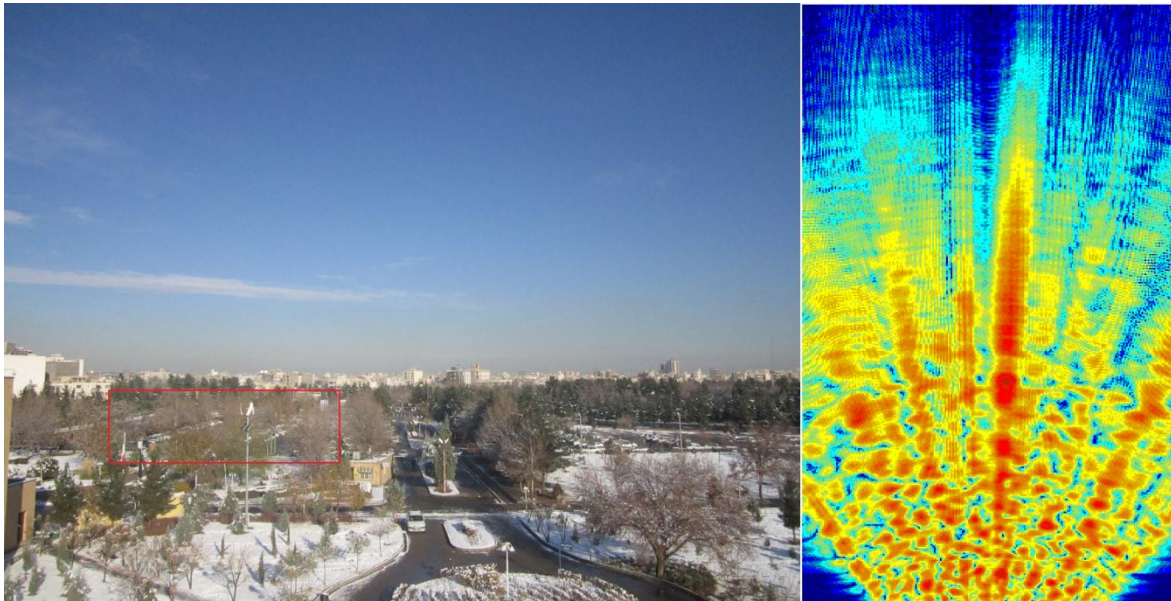


تصویر ۳- مدار دیجیتال ساخته شده

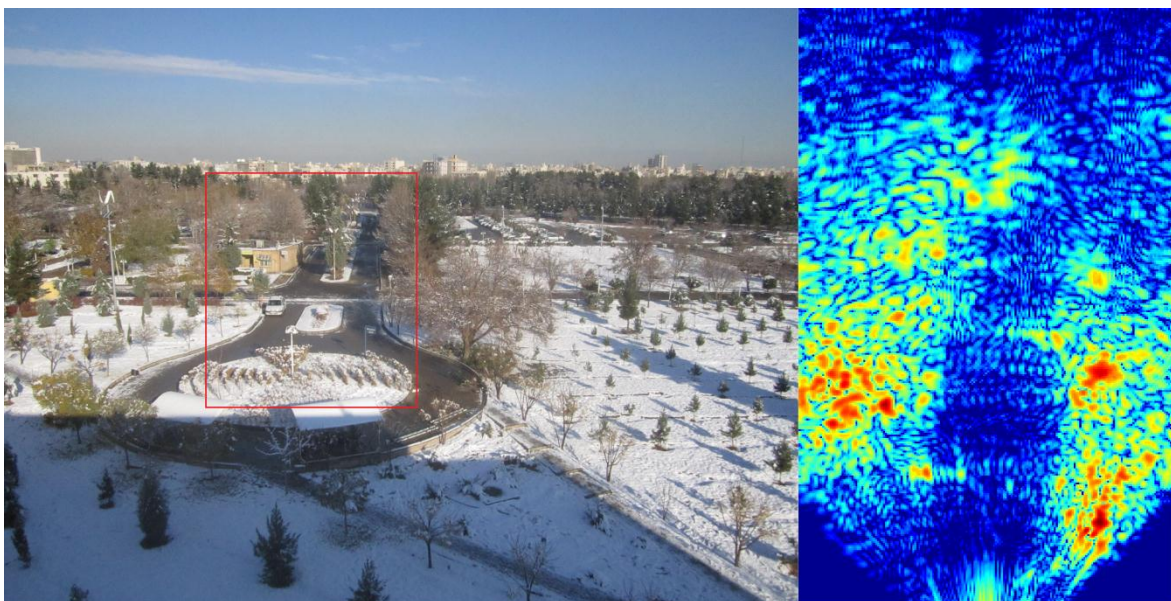


## ۷. نتایج

به منظور تولید تصویر، رادار طراحی شده، بر پشت بام دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی نصب و تصاویر به شرح زیر تولید شد.



تصویر ۳



تصویر ۴

## منابع

- [1] K. Ouchi, "Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with," Remote Sensing, vol. 5, pp. 716-807, 2013.
- [2] C. Romero, High Resolution Simulation of Synthetic Aperture Radar Imaging, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.
- [3] G. R. S. M. R. M. Carrara W. G, Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, Artech House, 1995.
- [4] F. H. W. Cumming Ian G., Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data, Artech House, 2005.
- [5] G. Charvat, "Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging," Radar Conference, no. RADAR, pp. 0138 - 0144, 2012.
- [6] W. B, Digital Signal Processing Techniques And Applications In Radar Image Processing, John Wiley & Sons Inc, 2008.