

تحلیل کارآیی چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر در فشرده سازی داده های خام رادار دهانه مصنوعی با استفاده از داده های خام رادار بومی ISRCSAR و ارائه رویکرد گزینش نرخ تطبیقی

مجید حاتم^{۱*}، علیرضا لیاقت^۲، نجمه مردانه^۳، مهدی حاتم^۴

۱ و ۴- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری، ۳- کارشناس ارشد، پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران

(دریافت: ۹۸/۰۹/۲۴؛ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۰)

چکیده

رویکرد چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر یا همان BAQ، یک رویکرد متداول جهت فشرده سازی داده های خام رادار دهانه مصنوعی (سار) محسوب می شود. در سامانه های تصویربرداری راداری، به ویژه سار فضاپایه، به دلیل حجم بالای داده اخذ شده برای هر ناحیه مورد تصویربرداری، ذخیره سازی یا ارسال داده خام از طریق لینک داده چالش بزرگی به حساب می آید. لذا در این سامانه ها با فشرده سازی داده خام، پهنای باند لینک داده یا حجم حافظه مورد نیاز برای ذخیره سازی آن به صورت موثر کاهش می یابد. در مسیر توسعه دانش فنی سار فضاپایه در کشور، طراحی و به کارگیری الگوریتم های فشرده سازی داده خام سار در پژوهشکده مکانیک توسعه یافته است. به منظور ارزیابی و تحلیل کارآیی این روش ها، از داده خام عملی رادار ISRCSAR که در پژوهشکده مکانیک طراحی و ساخته شده، استفاده گردیده است. از مهم ترین ایده هایی که در این مقاله بدان پرداخته می شود انتخاب نرخ بیت تطبیقی BAQ در فشرده سازی داده خام سار و همچنین اثر این گزینش نرخ بیت در کیفیت تصویر تشکیل شده توسط داده فشرده شده می باشد. جهت مقایسه تصاویر حاصله ناشی از نرخ بیت های متفاوت BAQ، از معیار PSNR و ارزیابی های بصری بر روی تصویر ناشی از داده خام غیر فشرده و داده خام فشرده شده استفاده گردیده است. نتایج این مقایسه کارآیی بالای رویکرد ارائه شده را نشان می دهد.

واژگان کلیدی

رادار دهانه مصنوعی، فشرده سازی، داده خام، چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر، تشکیل تصویر سار

۱. مقدمه

را دارند طراحی و ساخته شده اند که این مهم منجر به تولید حجم زیادی از داده خام می گردد.

از طرف دیگر حجم محدود حافظه موقت و پهنای باند محدود لینک انتقال داده در سامانه های سار، مستلزم کاهش حجم داده ای است که می بایست ذخیره شود و یا به ایستگاه زمینی ارسال گردد. لذا با توجه به موارد مطرح شده نیازمند الگوریتم هایی با نرخ فشرده سازی مناسب هستیم که بتوان داده خام را به طور مطلوب فشرده نمود به طوریکه کیفیت تصویر حاصله از تشکیل تصویر داده فشرده شده، تخریب نگردد.

بسیاری از رویکردهای چندی سازی^۴ داده خام سار در دو دهه گذشته توسعه یافته اند [۱-۳] و هم اکنون نیز در حال تکامل می باشند. گرچه محدودیت های موجود در سامانه های فضاپایه از حیث پهنای باند لینک انتقال داده و همچنین قطعات مورد

رادار دهانه مصنوعی به عنوان یک سامانه تصویربرداری راداری، قابلیت تصویربرداری در تمامی اوقات شبانه روز را داشته و عملکرد آن مستقل از شرایط جوی محیط می باشد. از دیگر مزیت های این سامانه نسبت به سامانه های تصویربرداری اپتیکی آن است که به شرط کفایت بودجه توان، تفکیک پذیری این سامانه مستقل از ارتفاع استقرار محموله می باشد.

امروزه با پیشرفت روزافزون تجهیزات راداری سار^۱، سامانه هایی با قدرت تفکیک پذیری بالا که دارای قابلیت چند قطبشی^۲ بوده و امکان تصویربرداری در چندین حالت^۳ عملکردی

* نویسنده مسئول: hatammajid@gmail.com

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

² Multi-Polarization

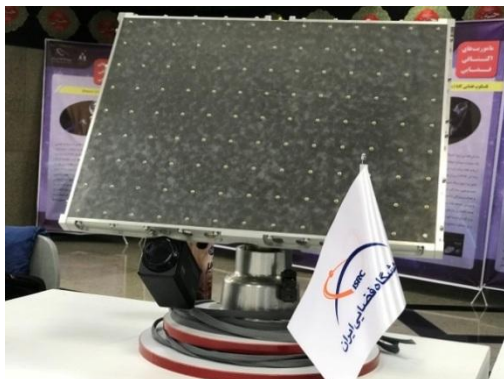
³ Mode

⁴ Quantization

پایاده‌سازی الگوریتم BAQ برای داده‌های خام سامانه ISRCSAR اشاره می‌گردد. در بخش چهارم به تحلیل تصاویر حاصله از داده‌های خام فشرده شده پرداخته می‌شود. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص دارد.

جدول (۱). مشخصات فنی سامانه ISRCSAR

ردیف	پارامتر	مقدار/شرح
۱	حالت کاری	نواری
۲	حداکثر برد رادار	۱۴ کیلومتر
۳	سرعت سکو	۶۰ m/s الی ۲۰ m/s
۴	فرکانس کاری	باند X
۵	بیشینه پهنای باند سیگنال LFM	۲۰۰ MHz
۶	قطبیت آنتن	خطی (عمودی)
۷	زاویه برخورد	۳۰ الی ۷۰ درجه
۸	تفکیک پذیری در راستای سمت و برد زمینی	بین ۱ تا ۲ متر
۹	بیشینه عرض نوار	۴۰۰۰ متر
۱۰	حداقل سطح مقطع راداری نرمالیزه	-۲۰ dB/m ²



(الف)



(ب)

شکل (۱): نمایی از سامانه ISRCSAR، (الف) آنتن و پایدارساز سامانه، (ب) ادوات RF و دیجیتال سامانه

استفاده با مشخصات فضایی، گزینش الگوریتم فشرده‌سازی جهت پایاده‌سازی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. این محدودیت‌ها موجب شده‌اند که در سامانه‌های سار عملیاتی از رویکردهای ساده و بهینه‌ی مبتنی بر BAQ^۱ استفاده شود [۴-۶].

روش چندی‌سازی بلوکی تطبیق پذیر یا همان BAQ از رایج‌ترین رویکردهای فشرده‌سازی داده به‌علت سادگی در کدگذاری و کدگشایی است. این رویکرد شامل یک چندی‌ساز بهینه است که سطوح چندی‌سازی را به توزیع داده‌های بلوک‌بندی شده مرتبط می‌سازد. در این روش از یک چندی‌ساز غیریکنواخت تحت عنوان Lloyd-max [۶]، جهت کمینه کردن میانگین مربعات خطا^۲ برای یک تعداد مشخص از سطوح چندی‌سازی، استفاده شده است. در [۷] نیز یک رویکرد با پیچیدگی محاسباتی کم جهت متمرکز کردن داده در راستای برد^۳ و همچنین فشرده‌سازی داده خام به‌وسیله الگوریتمی مبتنی بر چندی‌سازی برداری تطبیق‌پذیر^۴ ارائه شده است که موجب بهبود سیگنال به نویز داده متمرکز شده به مقداری کمتر از 1dB می‌گردد.

در [۸]، از یک رویکرد مبتنی بر موجک جهت کدگشایی داده خام سار استفاده شده است که در نرخ ۳ bit/sample موجب ۳ dB بهبود SNR می‌گردد. در [۹] نیز رویکرد BAQ به وسیله کدگذاری هافمن^۵ ارتقا یافته است.

در این مقاله به تحلیل رویکرد BAQ به‌عنوان محبوب‌ترین رویکرد فشرده‌سازی داده خام سار پرداخته شده و ملاحظاتی که در پایاده‌سازی روش فشرده‌سازی داده خام سار می‌بایست در مسیر توسعه دانش فنی سار فضایی در کشور مدنظر قرار گیرد، بیان می‌شود. از جمله مهم‌ترین مباحثی که در این مقاله بدان پرداخته می‌شود گزینش نرخ بیت BAQ در فشرده‌سازی داده خام به صورت متغیر می‌باشد به طوری که اثر انتخاب این نرخ بیت، از لحاظ کیفیت تصویر حاصله مناسب باشد. جهت پایاده‌سازی و تحلیل این رویکرد، از داده‌های عملی رادار ISRCSAR استفاده شده است؛ ISRCSAR یک رادار سار هواپایه است که توسط متخصصین پژوهشکده مکانیک طراحی و ساخته شده است. مشخصات فنی این سامانه در جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین در شکل (۱) نیز نمایی از این سامانه نشان داده شده است.

این مقاله شامل پنج بخش است. در بخش دوم به بررسی الگوریتم BAQ پرداخته می‌شود. در بخش سوم به اصول

¹ Block Adaptive Quantization

² MSE

³ Range Focusing

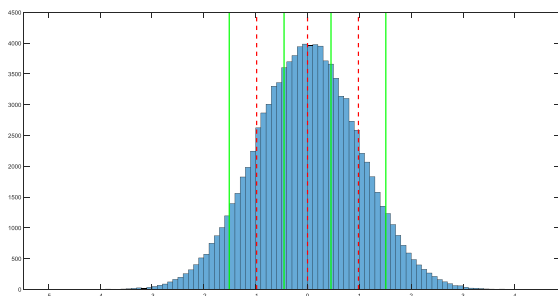
⁴ Adaptive Vector Quantization

⁵ Huffman Coding

صورت نرمال با میانگین صفر و واریانس ۱ باشد، مرزهای چندی سازی و سطوح بازسازی برای یک چندی ساز دو بیتی همانند شکل (۲) است.

جدول (۳): عملکرد چندی ساز Lloyd-max [۱]

مرحله	توضیحات
۱	<ul style="list-style-type: none"> ❖ مقداردهی اولیه سطوح بازسازی $\{y_i^{(0)}\}_{i=1}^M$ ❖ قرار دادن $k=0$ و $D^{(0)}=0$ (مرتبۀ تکرار و D مقدار انحراف می باشد) ❖ انتخاب یک مقدار آستانه برای ϵ
۲	محاسبه مرزهای چندی سازی بر اساس رابطه $b_j^{(k)} = \frac{y_j^{(k)} + y_{j+1}^{(k)}}{2}$
۳	محاسبه انحراف بر اساس رابطه ذیل: $D^{(k)} = \sum_{j=1}^N \int_{b_{j-1}^{(k)}}^{b_j^{(k)}} (x - y_j^{(k)})^2 f_X(x) dx$
۴	اگر $D^{(k)} - D^{(k-1)} < \epsilon$ متوقف شود در غیر این صورت مرحله بعد انجام پذیرد
۵	<ul style="list-style-type: none"> ❖ $k = k + 1$ ❖ محاسبه سطوح بازسازی جدید بر اساس رابطه ذیل: $y_j^k = \frac{\int_{b_{j-1}^{(k-1)}}^{b_j^{(k-1)}} x f_X(x) dx}{\int_{b_{j-1}^{(k-1)}}^{b_j^{(k-1)}} f_X(x) dx}$



شکل (۲): چندی ساز Lloyd-max دو بیتی برای یک مجموعه داده با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ۱

همان گونه که در شکل (۲) مشهود است مرزهای چندی سازی برابر با $[-0.9816, 0, 0.9816]$ (خط چین های قرمز) و سطوح بازسازی برابر با $[-1.5101, -0.4528, 0.4528, 1.5101]$ (خطوط سبز) می گردند.

۲. اصول رویکرد چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر

الگوریتم فشرده سازی مورد استفاده در سیستم های عملیاتی سار باید دارای ویژگی هایی نظیر پیچیدگی محاسباتی کم و نرخ فشرده سازی مناسب باشد و همچنین کیفیت تصویر حاصله را بیش از حد مطلوب تخریب نکند. در سامانه های سار فضاپایه عملیاتی، تقریباً تمامی الگوریتم های فشرده سازی مبتنی بر الگوریتم چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر [۱] می باشند. در جدول (۲) مشخصات لینک داده چند سامانه سار فضاپایه ارائه می گردد. همان گونه که در جدول (۲) مشخص است، اساس بسیاری از الگوریتم های فشرده سازی داده خام سار مبتنی بر رویکرد BAQ است.

جدول (۲): مشخصات لینک داده چند سامانه سار فضاپایه [۱۰]

ردیف	نام ماهواره	کشور سازنده	ظرفیت حافظه (Gbit)	نرخ انتقال داده (Mbit/s)	رویکرد فشرده سازی
۱	COSMO-SkyMed	ایتالیا	300	2 separate links at 150	BAQ
۲	Sentinel-1	اتحادیه اروپا	1,443	520	FDBAQ ¹
۳	TerraSar-x	آلمان	320 (BOL) 256 (EOL)	300	BAQ
۴	TanDEM-x	آلمان	768	300	BAQ
۵	RADARS AT2	کانادا	150	105	BAQ

الگوریتم BAQ یک الگوریتم فشرده سازی داده خام سار با عملکرد بلوکی است. این الگوریتم بر اساس چندی ساز غیریکنواخت Lloyd-Max طراحی شده است. لذا در زیر بخش ذیل، عملکرد این چندی ساز بیان می گردد.

۱-۲. چندی ساز Lloyd-max [۱]

این چندی ساز، یک چندی ساز اسکالر غیر یکنواخت می باشد که بر اساس توزیع یک مجموعه داده x با تابع چگالی احتمال $f_X(x)$ ، سطوح بازسازی و مرزهای چندی سازی را به صورت مرحله به مرحله و با هدف کمینه کردن میانگین مربع خطا، تغییر می دهد. در نهایت سطوح و مرزهای چندی سازی به مقادیر بهینه همگرا می گردند. عملکرد این الگوریتم برای یک مجموعه داده در جدول زیر نمایش داده شده است. همان طور که از جدول (۳) مشهود است، عملکرد این چندی ساز مبتنی بر داده و بر اساس هیستوگرام آن می باشد، برای مثال اگر توزیع داده به

¹ Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization

۲-۳. ویژگی چندی سازی Lloyd-max برای توزیع

گوسی

همان گونه که در زیر بخش‌های قبل بیان گردید، چندی ساز Lloyd-max مبتنی بر توزیع داده بوده و سطوح بازسازی و مرزهای چندی سازی طی یک رویه بازگشتی برای یک توزیع داده خاص به مقادیر بهینه همگرا می‌گردند. از آنجا که اساس این رویکرد بر مبنای رویه تکرار پذیر و بازگشتی استوار است، همگرایی این الگوریتم زمان بر است. لیکن اگر سطوح بازسازی و مرزهای چندی سازی را برای یک توزیع با میانگین صفر و واریانس واحد در یک LUT^۲ ذخیره گردد، آن گاه سطوح بازسازی و مرزهای چندی سازی برای یک توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 از رابطه زیر به دست می‌آیند [۱]:

$$y_i |_{\text{var}=\sigma^2} = \sigma \times y_i |_{\text{var}=1} \quad (۱)$$

$$b_i |_{\text{var}=\sigma^2} = \sigma \times b_i |_{\text{var}=1} \quad (۲)$$

y_i و b_i در روابط (۱) و (۲)، به ترتیب سطوح بازسازی و مرزهای چندی سازی بوده و σ انحراف معیار مرتبط به بلوک داده می‌باشد. همچنین از $y_i |_{\text{var}=1}$ تحت عنوان سطوح بازسازی نرمالیزه^۳ یاد می‌گردد.

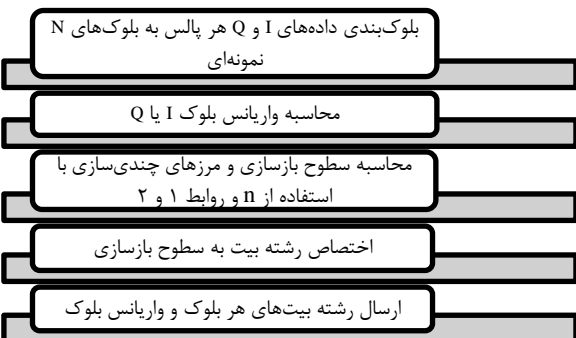
۲-۴. رویکرد چندی سازی بلوکی تطبیق پذیر (BAQ)

تاکنون به این موارد اشاره گردید:

➤ چندی ساز Lloyd-max یک چندی ساز مبتنی بر توزیع داده می‌باشد.

➤ کانال‌های I و Q رادار دهانه مصنوعی دارای توزیع نرمال با واریانس تقریباً یکسان و میانگین صفر می‌باشند.

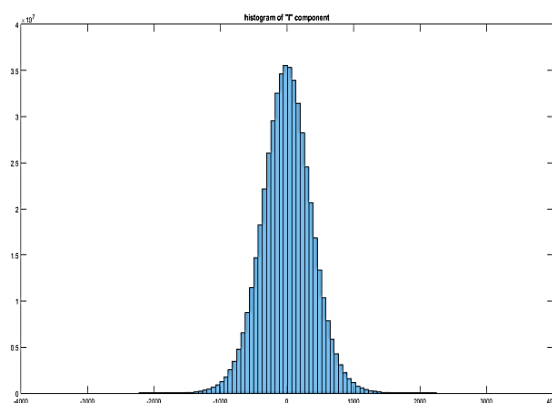
با تکیه بر دو موضوع فوق، عملکرد کدگذاری الگوریتم BAQ با تعداد بیت n (n تعداد بیت تخصیص یافته به هر نمونه می‌باشد)، به صورت ذیل تعریف می‌شود:



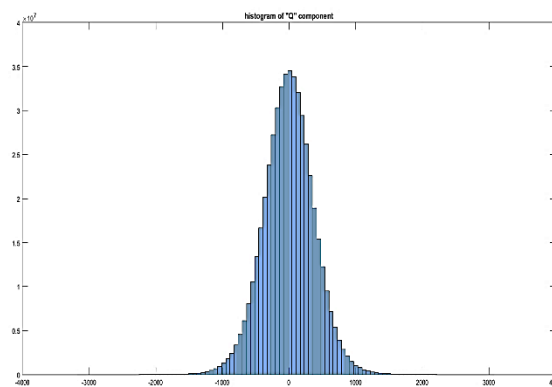
شکل (۴): عملکرد کدگذاری BAQ با تعداد بیت n [۱]

۲-۲. مشخصه داده های I و Q رادار دهانه مصنوعی

همان گونه که می‌دانیم در سامانه سار، سیگنال چرپ^۱ به ناحیه هدف ارسال شده و پژواک بازگشتی پس از نمونه برداری به باند پایه منتقل شده و به صورت مولفه های I و Q ذخیره می‌گردد. معمولاً از داده های کانال I و Q تحت عنوان داده های خام رادار دهانه مصنوعی یاد می‌شود. از مهم ترین ویژگی های داده I و Q این است که دارای توزیع نرمال بوده، میانگین آن ها صفر است و هم واریانس می‌باشند. برای مثال در شکل (۳) هیستوگرام داده های خام یک بلوک داده مربوط به سامانه تصویربرداری ISRC SAR نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ناحیه تصویربرداری، نخلستان های اطراف شهرستان جهرم در استان فارس می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که با دانستن واریانس مرتبط با یک بلوک داده خام سار در کانال های I یا Q، می‌توان توزیع احتمال کانال های آن بلوک داده را تخمین زد.



(الف)



(ب)

شکل (۳): هیستوگرام مربوط به کانال های I و Q از یک بلوک داده اخذ شده از سامانه ISRC SAR، مکان داده برداری: نخلستان های اطراف جهرم

² Look Up Table

³ Normalized Reconstruction Level (NRL)

¹ Chirp

بعد از آن تحت عنوان BAQMOD یاد می گردد و مقدار آن با n نشان داده می شود) می تواند اندازه و حجم متفاوتی داشته باشد. فرض کنید در یک سناریوی داده برداری، تعداد مولفه های کانال I و کانال Q برابر با $NCRS$ باشد. در سامانه ISRC SAR تعداد نمونه های موجود در هر بلوک داده برابر با ۱۲۸ نمونه لحاظ شده است. پس تعداد بلوک های ۱۲۸ نمونه ای ($^{(NB)}$) در یک سناریوی داده برداری از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$NB = \text{ceil} \left[\frac{NCRS}{128} \right] \quad (۳)$$

در این سامانه پاکت بندی داده های مرتبط به کانال های I و Q به صورت شکل (۷) لحاظ شده است:

همان گونه که در شکل (۷) مشهود است، تفاوت اصلی پاکت داده مربوط به کانال I و Q آن است که در ابتدای بلوک داده کانال Q ، یک پارامتر تحت عنوان THIND^۴ به صورت ۸ بیتی ذخیره شده است. این پارامتر یک شاخص از انحراف معیار کانال I (یا کانال Q) است که در روابط ۱ و ۲ با σ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در سامانه ISRC SAR، مقادیر انحراف معیار به وسیله برچسبی ۸ بیتی تحت عنوان THIND در یک LUT ذخیره شده اند. هر THIND که مقداری صحیح بین ۰ تا ۲۵۵ دارد معرف یک انحراف معیار است که با پارامتر $^V SF$ نشان داده شده است و به صورت یک LUT در مرحله کدگذاری و کدکشی مورد استفاده قرار می گیرد.

بلوک های BAQ

I SCode-1 n bit	I SCode-2 n bit	...	I SCode-128 n bit
Word 1 (16 bit)			
I SCode-129 n bit	I SCode-130 n bit	...	I SCode-256 n bit
...			
I SCode n bit	I SCode n bit	...	I SCode NCRS n bit
			Dummies Filler Bits word NW (16 bit)

(الف)

بلوک های BAQ

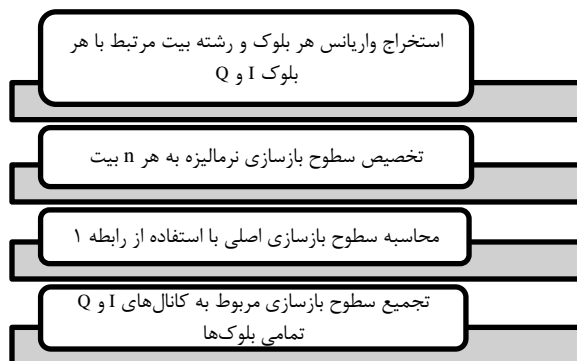
THIDX 1 8 bit	Q SCode-1 n bit	Q SCode-2 n bit	...	Q SCode-128 n bit
Word 1 (16 bit)				
THIDX 2 8 bit	Q SCode-129 n bit	Q SCode-130 n bit	...	Q SCode-256 n bit
...				
THIDX 2 8 bit	Q SCode n bit	Q SCode n bit	...	Q SCode NCRS n bit
				Dummies Filler Bits word NW (16 bit)

(ب)

شکل (۷): نحوه پاکت بندی داده در سامانه ISRC SAR. (الف)

پاکت بندی داده کانال I ، (ب) پاکت بندی داده کانال Q

هم چنین در رویه کدگشایی، مراحل زیر انجام می پذیرد:



شکل (۵): عملکرد کدگشایی BAQ با تعداد بیت n [۱]

۳. اصول پیاده سازی الگوریتم BAQ در سامانه ISRC SAR

در این بخش به اصول پیاده سازی الگوریتم BAQ در سامانه تصویربرداری راداری پژوهشکده مکانیک پرداخته می شود.

در شکل (۶) بلوک دیاگرام تشکیل رشته بیت در سامانه ISRC SAR نشان داده شده است. طبق این بلوک دیاگرام، سیگنال IF از مبدل آنالوگ به دیجیتال عبور کرده (لازم به ذکر است که مبدل آنالوگ به دیجیتال این سامانه ۱۶ بیتی بوده و با نرخ 1Gsample/sec نمونه برداری می کند) و پس از انتقال از بلوک DDC^۱، نرخ آن کاهش می یابد، تا این مرحله هر نمونه، به داده های مختلط به صورت کانال های هم فاز و متعام تبدیل شده است. سپس این داده های مختلط وارد بلوک BAQ شده و سپس طبق پاکت بندی^۲ خاص سامانه، رشته بیت خروجی تولید می گردد.



شکل (۶): بلوک دیاگرام تشکیل رشته بیت در سامانه ISRC SAR

۳-۱. رویه کدگذاری

هر مجموعه داده شامل تعدادی از نمونه های مبدل آنالوگ به دیجیتال در هر PRI^۳ می باشد که بر روی آن ها عملیات پردازشی فوق انجام می پذیرد. تعداد بیت اخذ شده در یک عملیات داده برداری راداری برابر با ضریب صحیحی از کلمات ۱۶ بیتی است. این داده اخذ شده بسته به تعداد بیت BAQ (که از این به

⁴ Number of Complex RADAR Samples

⁵ Number of Blocks

⁶ Threshold Index

⁷ Sigma Factor

¹ Digital Down Converter

² Packetization

³ Pulse Repet Interval

در رابطه (۶)، Sign نشان‌دهنده بیت علامت در کد BAQ بوده و SF و NRL به ترتیب انحراف معیار و سطح بازسازی نرمالیزه می‌باشد. حال با توجه به موارد ارائه شده به ذکر یک مثال پرداخته می‌شود: اگر در کدگذاری، از BAQ سه بیتی (BAQMOD=3) استفاده شود و کد مربوط به نمونه برابر با 110 و THIND=130 باشد با توجه به روابط ذیل می‌توان مقدار نمونه بازسازی شده (Svalue) را به صورت ذیل به دست آورد:

$$Scode = 110 \rightarrow Sign = 1 \text{ \& } Mcode_{binary} = 10$$

$$Mcode_{decimal} = 2 \rightarrow NRL = 1.3655$$

$$THIND = 130 \rightarrow SF = 100.58$$

$$Svalue = (-1)^{Sign} \cdot NRL \cdot SF$$

$$\rightarrow Svalue = (-1)^1 (1.3655) (100.58) = 137.3420$$

با توجه به موارد فوق‌الذکر، رویه استخراج نمونه‌های بازسازی شده‌ی کانال‌های I و Q در سامانه ISRC SAR در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول (۴): جدول مربوط به NRL به ازای BAQMOD برابر با ۱ تا ۵

BAQMOD					Mcode _{decimal}
بیت ۵	بیت ۴	بیت ۳	بیت ۲	بیت ۱	
۰.۰۶۵۹	۰.۱۲۸۴	۰.۲۴۵۱	۰.۴۵۲۸	۰.۷۹۷۹	۰
۰.۱۹۸۰	۰.۳۸۸۰	۰.۷۵۶۰	۱.۵۱۰۴		۱
۰.۳۳۱۳	۰.۶۵۶۸	۱.۳۴۳۹			۲
۰.۴۶۶۶	۰.۹۴۲۳	۲.۱۵۱۹			۳
۰.۶۰۴۹	۱.۲۵۶۲				۴
۰.۷۴۷۱	۱.۶۱۸۰				۵
۰.۸۹۴۵	۲.۰۶۹۰				۶
۱.۰۴۸۷	۲.۷۳۲۶				۷
۱.۲۱۱۷					۸
۱.۳۸۶۳					۹
۱.۵۷۶۱					۱۰
۱.۷۸۷۱					۱۱
۲.۰۲۸۶					۱۲
۲.۳۱۷۶					۱۳
۲.۶۹۱۰					۱۴
۳.۲۶۰۶					۱۵

۴. نتایج و بحث

جهت مقایسه تصاویر حاصله از رویکرد BAQ با BAQMODهای مختلف، داده‌های خام اصلی (که رویکرد فشرده‌سازی بر روی آن‌ها اعمال نشده است) و داده‌هایی که رویکرد کدگذاری BAQ بر روی آن‌ها اعمال شده به صورت همزمان ذخیره‌سازی شده‌اند. در نهایت با استفاده از این داده‌ها و با رویه نشان داده شده در شکل (۹)، تصویر سار تشکیل شده است. لازم به ذکر است که

تعداد کلمات ۱۶ بیتی در کانال I فشرده شده با توجه به تعداد بیت BAQ (BAQMOD) از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$NW_I = \begin{cases} \lceil \frac{1 \cdot NCRS}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 1 \text{ bit} \\ \lceil \frac{2 \cdot NCRS}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 2 \text{ bit} \\ \lceil \frac{3 \cdot NCRS}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 3 \text{ bit} \\ \lceil \frac{4 \cdot NCRS}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 4 \text{ bit} \\ \lceil \frac{5 \cdot NCRS}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 5 \text{ bit} \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین با توجه به وجود پارامتر THIND در ابتدای هر بلوک از داده‌های کانال Q، تعداد کلمات ۱۶ بیتی این کانال به صورت رابطه ۵ خواهد بود:

$$NW_Q = \begin{cases} \lceil \frac{1 \cdot NCRS + 8 \cdot NB}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 1 \text{ bit} \\ \lceil \frac{2 \cdot NCRS + 8 \cdot NB}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 2 \text{ bit} \\ \lceil \frac{3 \cdot NCRS + 8 \cdot NB}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 3 \text{ bit} \\ \lceil \frac{4 \cdot NCRS + 8 \cdot NB}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 4 \text{ bit} \\ \lceil \frac{5 \cdot NCRS + 8 \cdot NB}{16} \rceil & \text{if BAQMOD} = 5 \text{ bit} \end{cases} \quad (۵)$$

۳-۲. رویه کدگشایی

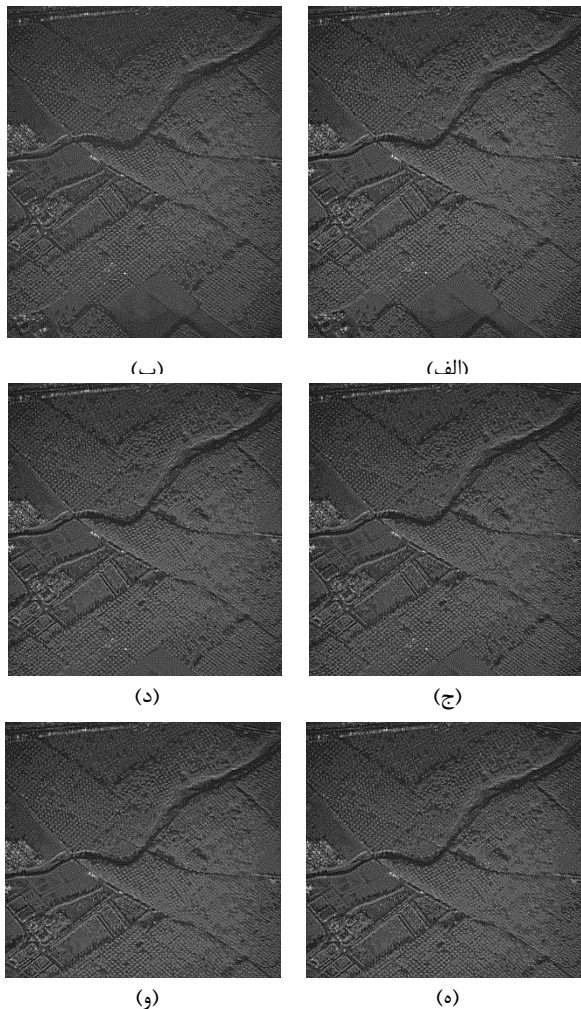
همانطور که قبلاً در شکل (۶) ارائه شد، در عملیات کدگشایی، هر نمونه از کانال I یا Q با یک Scode ارائه می‌شوند. هر Scode شامل یک بیت علامت یا Sign بوده و سایر بیت‌های Scode تشکیل Mcode یا رشته بیت مقدار خواهند داد. برای مثال در BAQ سه بیتی اگر Scode برابر با 110 باشد، آنگاه Sign=1 و Mcode=10 خواهد بود. همچنین برای کدگشایی نیاز به جدول NRLها خواهد بود، مقادیر مربوط به NRLها در جدول (۴) قابل مشاهده است. البته با توجه به اینکه داده‌های کانال‌های I و Q در یک بلوک واحد دارای میانگین صفر هستند می‌توان تنها به ارائه NRLهای مثبت پرداخت و از ارائه جداگانه NRLهای منفی صرف نظر کرد.

جهت کدگشایی و بازسازی سطوح از روی Scodeها، از رابطه (۶) استفاده می‌گردد.

$$Svalue = (-1)^{Sign} \cdot NRL \cdot SF \quad (۶)$$

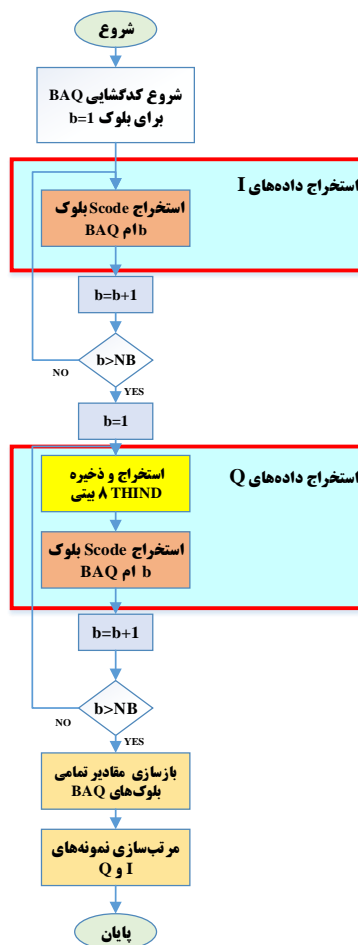
¹ Sample Code

در تصاویر شکل (۱۰)، خروجی ناشی از داده برداری راداری سامانه ISRC SAR از نخلستان های اطراف شهر جهرم در استان فارس نشان داده شده است.

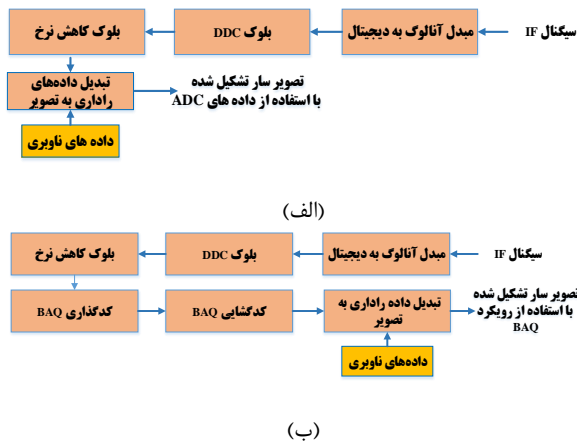


شکل (۱۰): تصویر حاصله از داده برداری راداری از نخلستان های اطراف شهر جهرم، (الف) تصویر حاصله از داده خام اصلی، (ب-و) تصویر حاصله با استفاده از رویکرد BAQ یک بیتی تا ۵ بیتی، (ز) تصویر google map مربوطه

جهت تشکیل تصویر و تبدیل داده های راداری به تصویر رادار دهانه مصنوعی از الگوریتم برد-داپلر^۱ [۱۱] استفاده شده است.



شکل (۸): رویه کدگذاری و استخراج نمونه های بازسازی شده ی کانال های I و Q در سامانه ISRC SAR



شکل (۹): رویه تشکیل تصویر برای (الف) داده خام اصلی و (ب) داده های مبتنی بر رویکرد کدگذاری و کدگذاری BAQ

¹ Range-Doppler



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

همانطور که در این شکل‌ها مشخص است، تصاویر ناشی از داده خام اصلی و داده‌های مبتنی بر BAQ یک بیتی تا پنج بیتی از لحاظ بصری تفاوت چندانی با هم ندارند. جهت مقایسه کمی، از معیار PSNR^۱ [۱۲] استفاده شده است. رابطه PSNR برای تصاویر ۸ بیتی I_1 و I_2 با ابعاد $M \times N$ در رابطه (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که MSE معرف میانگین مربعات خطا^۲ می‌باشد.

$$PSNR = \frac{255^2}{MSE} \quad (7)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_1(i,j) - I_2(i,j))^2$$

جهت مقایسه کمی با استفاده از معیار PSNR، I_1 را تصویر خروجی ناشی از بلوک دیاگرام شکل (۹-الف) و I_2 را تصویر خروجی ناشی از بلوک دیاگرام شکل (۹-ب) در نظر می‌گیریم. در جدول (۵) مقادیر PSNR مربوط به تصاویر ناشی از اعمال BAQ یک بیتی تا ۵ بیتی با معیار قرار دادن تصویر ناشی از داده خام اصلی نشان داده شده است.

جدول (۵): مقادیر PSNR برای داده‌های مربوط به نخلستان‌های اطراف شهر جهرم (زمان داده‌برداری ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۶ ساعت ۱۳:۲۵، مختصات طول و عرض جغرافیایی مرکز تصویر: Lon: 28.5041 و Lat: 53.5270)

ردیف	رویکرد BAQ	PSNR (dB)	نرخ فشرده‌سازی
۱	BAQMOD=1 bit	۳۵,۳۰۷۲	۸
۲	BAQMOD=2 bit	۳۶,۷۴۴۴	۴
۳	BAQMOD=3 bit	۴۵,۷۸۲۴	۲,۶۶۷
۴	BAQMOD=4 bit	۴۹,۱۸۸۰	۲
۵	BAQMOD=5 bit	۵۵,۱۳۹۵	۱,۶

در تاحیه مربوط به نخلستان‌های اطراف جهرم، اهداف غالباً دارای سطح مقطع راداری کم می‌باشند. در تصاویر مربوط به شکل (۱۱)، ناحیه داده‌برداری متعلق به پالایشگاه سروستان است که اهداف با RCS بالاتر نیز در آن وجود دارد. مقادیر PSNR مربوطه نیز در جدول (۶) آورده شده است.

^۱ Peak Signal To Noise Ratio^۲ Mean Square Error

همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است، برای اهداف بزرگ با سطح مقطع راداری زیاد اگر تعداد بیت های BAQ کم باشد شاهد یک اثر مخرب در نواحی اطراف هدف خواهیم بود، این اثر مخرب با افزایش تعداد بیت های BAQ از بین می رود.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): اثر مخرب ناشی از اعمال BAQ یک بیتی در اطراف هدف بزرگ با RCS نرمالیزه بالا که به صورت پخش شدگی مشهود است، (الف) تصویر حاصله از داده BAQ یک بیتی، (ب) تصویر حاصله از BAQ پنج بیتی

دلیل این امر آن است که توزیع داده I و Q برای اهدافی بزرگ با سطح مقطع راداری بالا، از توزیع نرمال (که پیش فرض الگوریتم BAQ است) خارج می شود. در شکل (۱۳) این موضوع برای دو نمایانگر بلوکی از داده برداری نخلستان اطراف شهر جهرم است که هیستوگرام داده I (و یا Q) آن نزدیک به توزیع نرمال بوده و لذا پیش فرض اولیه الگوریتم BAQ را برآورده می سازد. همچنین شکل (۱۳-ب) نشانگر بلوکی از داده برداری پالایشگاه سروسن



(ه)



(و)



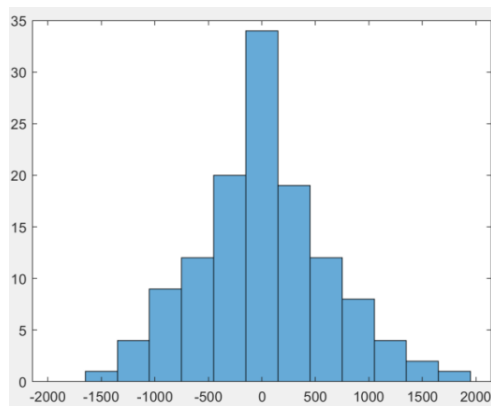
شکل (۱۱): تصویر حاصله از داده برداری راداری از پالایشگاه سروسن فارس و زمین های زراعی اطراف، (الف) تصویر حاصله از داده خام اصلی، (ب-و) تصویر حاصله با استفاده از رویکرد BAQ یک بیتی تا ۵ بیتی، (ز) تصویر google map مربوطه

جدول (۶): مقادیر PSNR برای داده های مربوط به پالایشگاه سروسن (زمان داده برداری ۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ ساعت ۱۰:۳۸، مختصات طول و عرض جغرافیایی مرکز تصویر: Lat: 29.2532 و Lon: 53.1202)

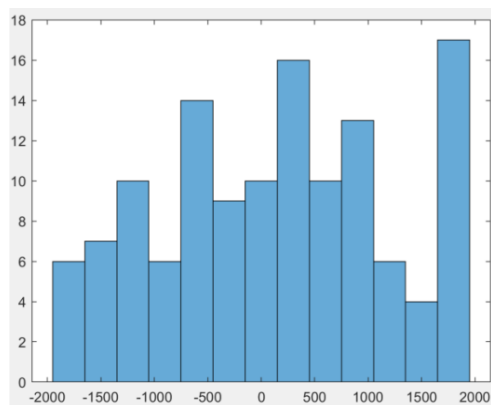
ردیف	رویکرد BAQ	PSNR (dB)	فشرده سازی	نرخ
۱	BAQMOD=1 bit	۲۵,۵۷۷۱	۸	
۲	BAQMOD=2 bit	۲۷,۱۷۳۳	۴	
۳	BAQMOD=3 bit	۳۰,۰۴۶۸	۲,۶۶۷	
۴	BAQMOD=4 bit	۳۵,۹۰۷۴	۲	
۵	BAQMOD=5 bit	۴۰,۴۷۸۵	۱,۶	

را بالا برد (برای این اهداف BAQMOD برابر ۵ بیت انتخاب می‌گردد).

بر این اساس و برای بهینه سازی روش فشرده سازی در عین حفظ کیفیت تصویر، نرخ BAQMOD در هر بخش از داده برداری و بر اساس ماهیت ناحیه تصویربرداری (طبیعی، شهری یا صنعتی)، مشخص می‌گردد. برای این منظور لازم است که اطلاعات مربوط به ماهیت ناحیه تصویربرداری بر اساس طول و عرض ناحیه جغرافیایی در یک بانک اطلاعاتی ذخیره شده و مبنای انتخاب نرخ BAQMOD در هر ناحیه قرار گیرد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۳): هیستوگرام داده کانال I برای یک بلوک ۱۲۸ نمونه‌ای. (الف) بلوکی از داده برداری نخلستان اطراف شهر جهرم که هیستوگرام داده I آن نزدیک به توزیع نرمال می‌باشد. (ب) بلوکی از داده برداری پالایشگاه سروسنجان که توزیع داده I آن غیر نرمال است.

۵. نتیجه گیری

در مسیر توسعه دانش فنی سار فضاپایه در کشور، طراحی و به کارگیری الگوریتم‌های فشرده سازی داده خام سار در پژوهشکده مکانیک توسعه یافته است. برای ارزیابی و تحلیل کارایی این روش‌ها، از داده خام عملی رادار ISRCSAR که در پژوهشکده مکانیک طراحی و ساخته شده، استفاده گردیده است.

است که توزیع داده I (و یا Q) آن غیر نرمال بوده و ملاحظات اولیه الگوریتم BAQ را ندارد.

با توجه به نتایج فوق‌الذکر، در انتخاب نرخ BAQMOD در سامانه ISRCSAR، نکات ذیل در نظر گرفته شده است:

❖ طی داده برداری‌های متعدد از مناطق گوناگون که شامل اهداف با RCS‌های نرمالیزه مختلف و اندازه‌های گوناگون است، مقدار کمینه BAQMOD به گونه‌ای انتخاب شد که مقدار PSNR با توجه به موارد مطرح شده در بخش ۴، از مقدار 30 dB بیشتر گردد. بر این اساس، حداقل مقدار BAQMOD برابر با ۳ بیت انتخاب شد.

❖ حد بالای BAQMOD، کمترین مقداری در نظر گرفته شد که مقدار PSNR حداقل برابر 40 dB گردد، بر این اساس بیشینه BAQMOD برابر با ۵ بیت در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با توجه به ملاحظات مربوط به نرخ فشرده سازی باید این نکته را در نظر داشت که BAQMOD‌های ۶ بیت به بالا علاوه بر اینکه نرخ فشرده سازی چندان بالایی ندارند، از لحاظ کیفیت تصویر خروجی نیز تفاوت بصری چندان ایجاد نکرده و تفاوت PSNR ناشی از آن از لحاظ بصری قابل نظر است.

❖ مقدار BAQMOD بهینه به ناحیه داده برداری بستگی دارد. بر طبق آزمایشات صورت گرفته، در سامانه ISRCSAR، مقدار BAQMOD برای نواحی داده برداری مختلف به صورت جدول (۷) در نظر گرفته می‌شود:

جدول (۷): مقدار BAQMOD بهینه برای نواحی مختلف

ردیف	ناحیه داده برداری	BAQMOD
۱	نواحی طبیعی آرام نظیر دریاها، دشت‌ها، زمین‌های کشاورزی و ...	۳ بیت
۲	نواحی شهری که اهدافی با RCS نرمالیزه متوسط را در بر می‌گیرند (نظیر اتومبیل در جاده)	۴ بیت
۳	نواحی صنعتی (یا شهری) که اهدافی با RCS نرمالیزه بالا و ابعاد بزرگ را در بر دارند (نظیر فرودگاه‌ها و ...) و همچنین پالایشگاه‌ها، سوله‌ها، کارخانجات و ...	۵ بیت

باید به این نکته توجه داشت که اهداف مدنظر در ردیف ۳ از جدول (۷)، اهدافی هستند که هیستوگرام داده I (و یا Q) آن‌ها غیر نرمال می‌گردد و برای این اهداف می‌بایست نرخ BAQMOD

- [5] Hamkins, Jon, and Kenneth Zeger. "Gaussian source coding with spherical codes." *IEEE Transactions on Information Theory* 48.11 (2002): 2980-2989.
- [6] Kwok, Ronald, and William TK Johnson. "Block adaptive quantization of Magellan SAR data." *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing* 27.4 (1989): 375-383.
- [7] D'Elia, Ciro, Giovanni Poggi, and Luisa Verdoliva. "Compression of SAR raw data through range focusing and variable-rate trellis-coded quantization." *IEEE Transactions on Image Processing* 10.9 (2001): 1278-1287.
- [8] Pascazio, Vito, and Gilda Schirinzi. "SAR raw data compression by subband coding." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41.5 (2003): 964-976.
- [9] Algra, Theo. "Data compression for operational SAR missions using entropy-constrained block adaptive quantisation." *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 2. IEEE, 2002.
- [10] EOPORTAL Directory, <https://directory.eoportal.org/>, 2020.
- [11] S. R. Mohseni*, M. M. Nayebi, R. Mohseni, B. Ebrahimi. "Introducing Azimuth FFT Architecture in Range-Doppler Imaging Algorithm in SAR Systems." *Journal of Radar*. Vol. 3, No. 1, 2015 (Serial No. 7), (In Persian).
- [12] Huynh-Thu, Quan, and Mohammed Ghanbari. "Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment." *Electronics letters* 44.13 (2008): 800-801.

در این مقاله به اصول پیاده سازی الگوریتم BAQ در سامانه ISRCSAR به عنوان یک رویکرد مطرح در فشرده سازی داده خام SAR و تحلیل رویکرد انتخاب BAQMOD پرداخته شد. بر این اساس، بر مبنای ناحیه مدنظر و اهداف موجود در آن ناحیه، نرخ BAQMOD بهینه پیشنهاد گردید.

رویکرد ارائه شده، علاوه بر ویژگی های نظیر پیچیدگی محاسباتی کم و نرخ فشرده سازی مناسب، از لحاظ کیفیت بصری تصویر و معیار PSNR، دارای نتایج مطلوب می باشد.

۵. مراجع

- [1] D'Elia, Ciro, Giovanni Poggi, and Luisa Verdoliva. "Compression of SAR raw data through range focusing and variable-rate trellis-coded quantization." *IEEE Transactions on Image Processing* 10.9 (2001): 1278-1287.
- [2] Gleich, Dusan, et al. "Progressive space frequency quantization for SAR data compression." *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 40.1 (2002): 3-10.
- [3] Magli, Enrico, and Gabriella Olmo. "Lossy predictive coding of SAR raw data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41.5 (2003): 977-987.
- [4] Algra, Theo. "Data compression for operational SAR missions using entropy-constrained block adaptive quantisation." *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 2. IEEE, 2002.

Performance Analysis of Block Adaptive Quantization in Synthetic Aperture Radar Raw Data Compression using Domestic ISRCSAR Raw Data and Adaptive Rate Selection Approach

M. Hatam^{*}, A.R.Liaghat, N. Mardaneh, M. Hatam

^{*}Institute of Mechanics, Shiraz, Iran

(Received: 15/12/2019, Accepted: 09/05/2020)

Abstract

The adaptive block quantization approach, or BAQ, is a common approach to compress synthetic aperture radar raw data. Radar imaging systems, especially spaceborne SAR system, exploit large bandwidths and high sampling rates, resulting in large bitstreams to be handled. This leads to a large volume of data obtained for each area being imaged, and storing or sending these raw data through a data link is a major challenge. Therefore, by using “raw data compression”, data link bandwidth and the needed memory space can be reduced effectively. In the course of developing the technical knowledge of spaceborne SAR systems in the country, the design and implementation of SAR raw data compression algorithms have been developed in the Institute of Mechanics. In order to evaluate and analyze the efficiency of these methods, the raw data of ISRCSAR; a SAR system developed by the Institute of Mechanics are used. One of the most important issues discussed in this paper is the adaptive selection of the BAQ rate in the raw data compression as well as the effect of this bit rate selection on the quality of the image which is formed by the compressed data. To compare the resulting images from different BAQ bit rates, the PSNR criterion and visual evaluations of the resulting images are used. The results of this comparison indicate the high performance of the proposed approach.

Keywords: Synthetic aperture radar, compression, raw data, Block Adaptive Quantization, image formation

^{*} Corresponding author E-mail: hatammajid@gmail.com