

پیاده سازی الگوریتم پوشانه‌ی تطبیقی جهت تشخیص بهینه مواد چگال (ضخیم با عدد اتمی بالا) در تصویربرداری اشعه‌ی ایکس دو انرژی

جعفری، حسین^۱؛ شورابی، رضا^۲؛ هاشمی نژاد، سید محمد^۳

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

^۲دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، گروه ریاضی محض

^۳دانشگاه آزاد تهران مرکز، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

تکنیک تصویربرداری اشعه ایکس دو انرژی بر این واقعیت استوار است که ضریب جذب اشعه‌ی ایکس برای مواد با عدد اتمی کم^۱ (Z-کم) کاهش و برای مواد با عدد اتمی بالا افزایش می‌یابد. روش‌هایی که از نسبت تضعیف برای تصاویر انرژی بالا به تصاویر انرژی پایین به‌عنوان شاخصی برای مقدار Z استفاده می‌کنند، توسط افراد زیادی ارائه شده است. با این حال، خطاهای آماری مرتبط با آن انکار ناپذیر است. این مقاله مشکلاتی را که در راه استفاده از یک سیستم دو انرژی، جهت شناسایی مواد با عدد اتمی بالا که به عنوان مواد Z-زیاد نیز شناخته می‌شوند، شرح خواهد داد و از روشی که پوشانه‌ی تطبیقی نامیده شده برای مشخص کردن Z-زیادهای احتمالی جهت کاهش هشدار غلط استفاده می‌نماید. واژه‌های کلیدی: تفکیک مواد، تصویربرداری اشعه‌ی ایکس دو انرژی.

مقدمه:

تصویربرداری دو انرژی^۲ تکنیکی است که به موجب آن یک شیء در دو سطح انرژی اشعه‌ی ایکس اسکن می‌گردد تا اطلاعات مربوط به ترکیب اتمی (Z) آن شیء استخراج شود [1]. وظیفه‌ی یک سیستم تصویربرداری DE به صورت ساده می‌تواند تقسیم تصویر مورد مطالعه به سه کلاس مواد آلی، مواد نیمه آلی و مواد معدنی باشد. با این وجود به منظور تفکیک بهتر برخی اشیاء Z-زیاد، الگوریتم تفکیک مواد در این سیستم‌ها می‌تواند به دو کلاس ساده‌ی مواد Z-زیاد و مواد غیر Z-زیاد نیز دسته بندی شود. هم‌چنان‌که فرآیندهای یادشده قابل ساده‌سازی است، به شدت چالش برانگیز هم خواهد بود، چرا که به هنگام شمارش فوتون‌ها، نویز سیستمی عدم قطعیت را وارد محاسبات خواهد ساخت. تاکنون برای به‌کار بستن یک سیستم دو انرژی جهت

¹ Low Atomic Number (Low-Z)

² Dual Energy Imaging (DE)

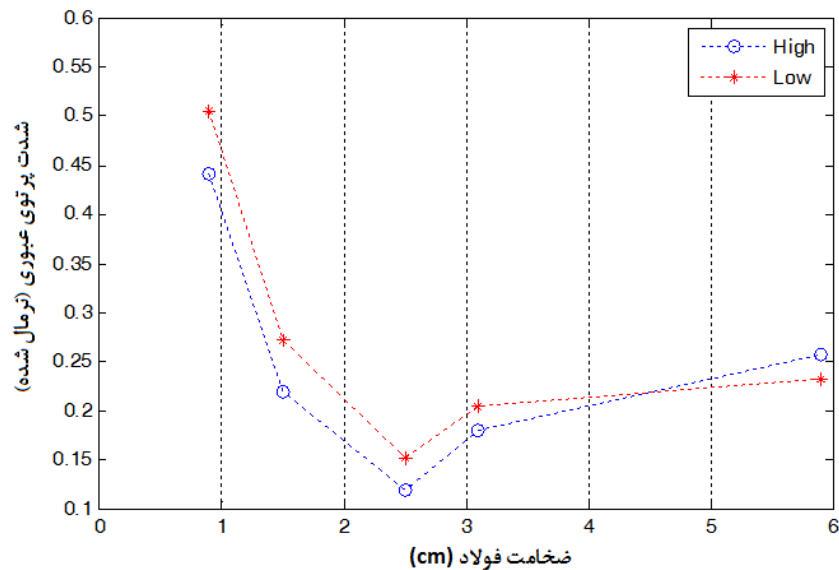
تفکیک مواد، روش‌های زیادی ارائه شده است. در یکی از کارهای پیشگام، اوگورودینکوف و پترونین [2-5] ایده‌ی اصلی، استفاده از نسبت میرایی در دو سطح انرژی مختلف یعنی انرژی بالا^۳ و انرژی پایین^۴ برای تعیین عدد اتمی Z می‌باشد.

$$(1) \quad \frac{\ln Tr(HE,Z)}{\ln Tr(LE,Z)} = \frac{\mu(HE,Z)t}{\mu(LE,Z)t} = \frac{\mu(HE,Z)}{\mu(LE,Z)} = \delta(HE, LE, Z)$$

نسبت δ تابعی از دو سطح انرژی و عدد اتمی است. اگر سیستم مورد استفاده تک رنگی باشد (برای مواد یکسان اسکن شده توسط سیستم‌های یکسان) نسبت یاد شده صرف نظر از ضخامت ماده‌ی مورد نظر یک عدد ثابت خواهد بود. نسبت δ برای سیستم تصویربرداری چند رنگی با ضخامت ماده‌ی مورد بررسی تغییر خواهد کرد. علت این امر آن است که طیف مربوط به فوتون‌ها از عمق مسیری که پرتو طی می‌کند تأثیر می‌گیرد. مواد ضخیم‌تر فوتون‌های با انرژی کمتر را فیلتر خواهند کرد که این اثر سخت‌گردانی پرتو نامیده می‌شود. هنگامی که طیف مورد نظرمان سخت‌گردانی شود، نسبت بالا که تابعی از میرایی اندازه‌گیری شده است تابعی از ضخامت شیء مورد بررسی خواهد شد. میرایی اندازه‌گیری شده را می‌توان با کمک ضخامت مؤثر یا ضخامت معادل توضیح داد. در این روش، کاربر درک بهتری از میزان ضخامت یا چگالی ماده به هنگام مقایسه با ماده‌ی مرجع، خواهد داشت. اما در عالم واقع، این فرض را تنها می‌توان برای مواد مشخص با گستره‌ی ضخامت‌های مشخصی به کار برد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که نسبت مربوط به فولاد تا زمانی که ضخیم‌تر از یک اینچ شود خطی است و نسبتاً ثابت می‌ماند، اما در ضخامت‌های بیشتر از یک اینچ، نتایج دچار دگرگونی می‌شوند. در شکل ۱ نمودار میانگین شدت‌های پرتوی عبوری از فولاد بر حسب ضخامت‌های ۰/۹cm، ۱/۵cm، ۲/۵cm، ۳/۱cm و ۵/۹cm برای تصاویر انرژی پایین و انرژی بالا از یک سیستم تصویربرداری با انرژی ۱۶۰keV و ۱/۱mA رسم شده است. همانطور که از شکل ۱ مشخص است نکته فوق به خوبی در این نمودار قابل رویت است. تحت این شرایط استفاده از الگوریتم‌های تفکیک مواد ضخیم و با عدد اتمی بالا (Z- زیاد) از مواد سبکتر بسیار حائز اهمیت است.

³ High Energy

⁴ Low Energy



شکل ۱: نمودار میانگین شدت های فولاد بر حسب ضخامت های ۰/۹cm، ۲/۵cm، ۳/۱cm و ۵/۹cm برای تصاویر انرژی پایین و انرژی بالا از یک سیستم تصویربرداری با انرژی ۱۶۰keV و ۱/۱mA.

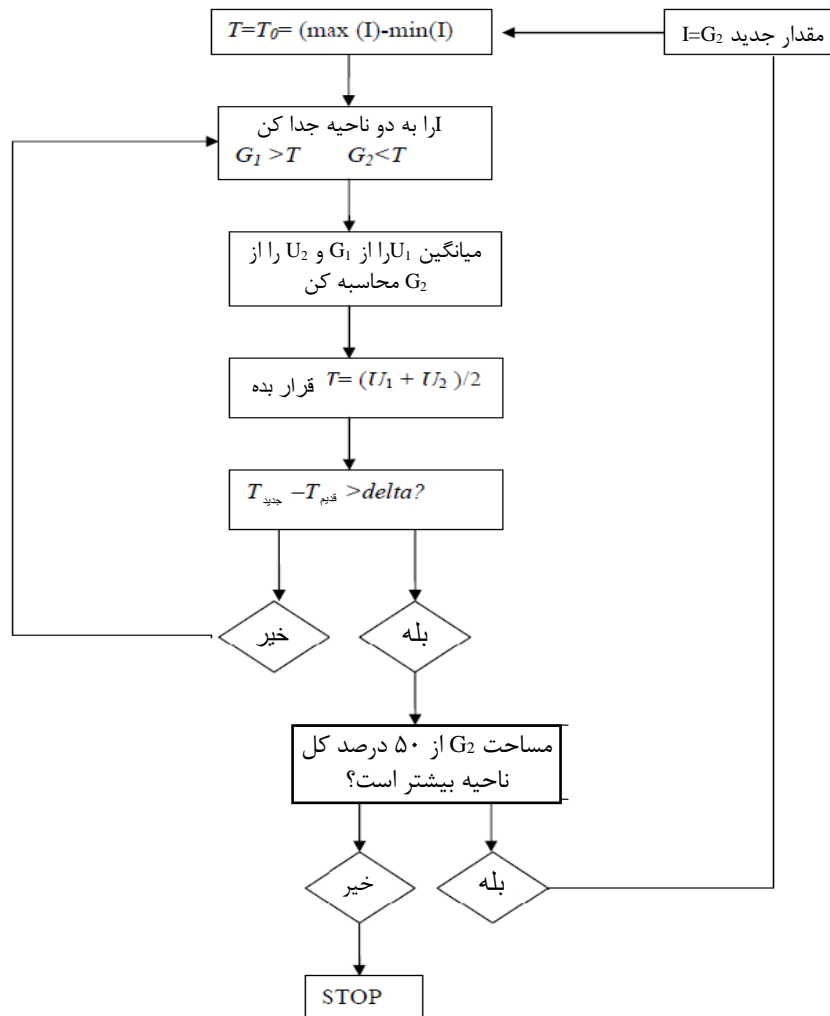
الگوریتم پیشنهادی:

پوشانه‌ی تطبیقی روشی پیشنهادی برای شناسایی مواد Z-زیاد بخصوص اشیاء محافظت شده توسط فولاد یا سرب می‌باشد. قسمت اصلی این روش از بین بردن هشدارهای غلط ایجاد شده با پراکندگی یا نویز مربوط به سیستم می‌باشد. قطعه‌بندی پوشانه‌ی تطبیقی شامل دو بخش است: بخش اول قطعه قطعه کردن T-نگاشت پر انرژی است (شکل ۲). آستانه سازی در هر ناحیه پوششی به کار می‌رود. هدف این کار قطعه قطعه کردن اشیاء به عنوان «پوشانه»هایی برای آستانه سازی نگاشت احتمال است. در قطعه‌بندی T-نگاشت ابتدا آستانه اولیه T_0 به عنوان میانگین مقادیر ماکسیمم و مینیمم سطح خاکستری در تمام تصویر $I(x,y)$ انتخاب می‌شود. سپس، پیکسل‌های تصویر به دو گروه $G_1(x,y)$ و $G_2(x,y)$ تقسیم می‌گردد به طوریکه اولی شامل نواحی ای است که مقادیر بزرگتر از آستانه دارند و دومی بقیه نواحی را شامل می‌شود، یعنی:

$$G_1(x,y) = \begin{cases} 0 & \forall x,y \in \{I(x,y) < T\} \\ I(x,y) & \forall x,y \in \{I(x,y) \geq T\} \end{cases} \quad (2)$$

و

$$G_1(x,y) = \begin{cases} 0 & \forall x,y \in \{I(x,y) \geq T\} \\ I(x,y) & \forall x,y \in \{I(x,y) > T\} \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم آستانه‌سازی T-نگاشت.

با استفاده از میانگین مقادیر سطح سیاه و سفیدی برای هر ناحیه، یک آستانه جدید به دست می‌آید و از آن برای به دست آوردن $G_1(x,y)$ و $G_2(x,y)$ جدید استفاده می‌شود تا زمانی که آستانه همگرا شود. بنابراین اگر نتیجه قطعه‌بندی (ناحیه‌ای که در آن $G_1(x,y) > 0$)، جسمی بزرگتر از $\frac{1}{p}$ مساحت زمینه دهد، لازم است که تمام فرآیند بر روی $G_1(x,y)$ را دوباره تکرار کنیم تا زمانی که اندازه‌اش به این ضوابط بخورد.

این حلقه زمانی پایان می‌یابد که $G_1(x,y)$ جدید با $G_2(x,y)$ قدیمی حاصل از تکرارهای قبلی، یکسان شود. این حالت بدین معناست که هیچ پیکسل دیگری نمی‌تواند از ناحیه جدا شود و اگر ناحیه $G_1(x,y) > 0$ بزرگتر از 60٪ کل زمینه باشد، به این دلیل است که هیچ جسمی در داخل ناحیه وجود ندارد یا خود ناحیه یک شیء است. در هر دو صورت، ما کل ناحیه را به عنوان یک شیء در نظر می‌گیریم. پس از قطعه‌بندی، نقشه‌ی ضخامت تمام اشیاء را با اختصاص دادن یک عدد به هر ناحیه‌ی ایزوله‌ی مرتبط،

برچسب می‌زنیم. نتیجه‌ی قطعه‌بندی T-نگاشت می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1G_1(x, y) > 0 \\ 0G_1(x, y) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

قسمت دوم الگوریتم پوشانه‌ی تطبیقی قطعه‌بندی آستانه‌ای در P-نگاشت است. با به‌کارگیری روش آستانه‌ای مشابه T-نگاشت انتظار می‌رود که نواحی با احتمال بالا در هر ناحیه قطعه‌بندی شوند. همچنین، الگوریتم خودکار آستانه‌ی وقتی نگاشت احتمال خیلی نویز دارد قادر به کار نخواهد بود. دلیل این مسئله این است که تقابل بین اشیاء و زمینه کم می‌باشد. آستانه باید خیلی سریع همگرا شود و بسیاری از پیکسل‌های زمینه را به‌عنوان پیکسل‌های شیء دسته‌بندی کند. پوشش آستانه P-نگاشت توسط پوشش M تحت عنوان زیر بیان می‌شود:

$$P_{\text{masked}}(x, y) = \begin{cases} 0M(x, y) = 0 \\ P_{\text{th}}(x, y) & M(x, y) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

یا به‌طور ساده:

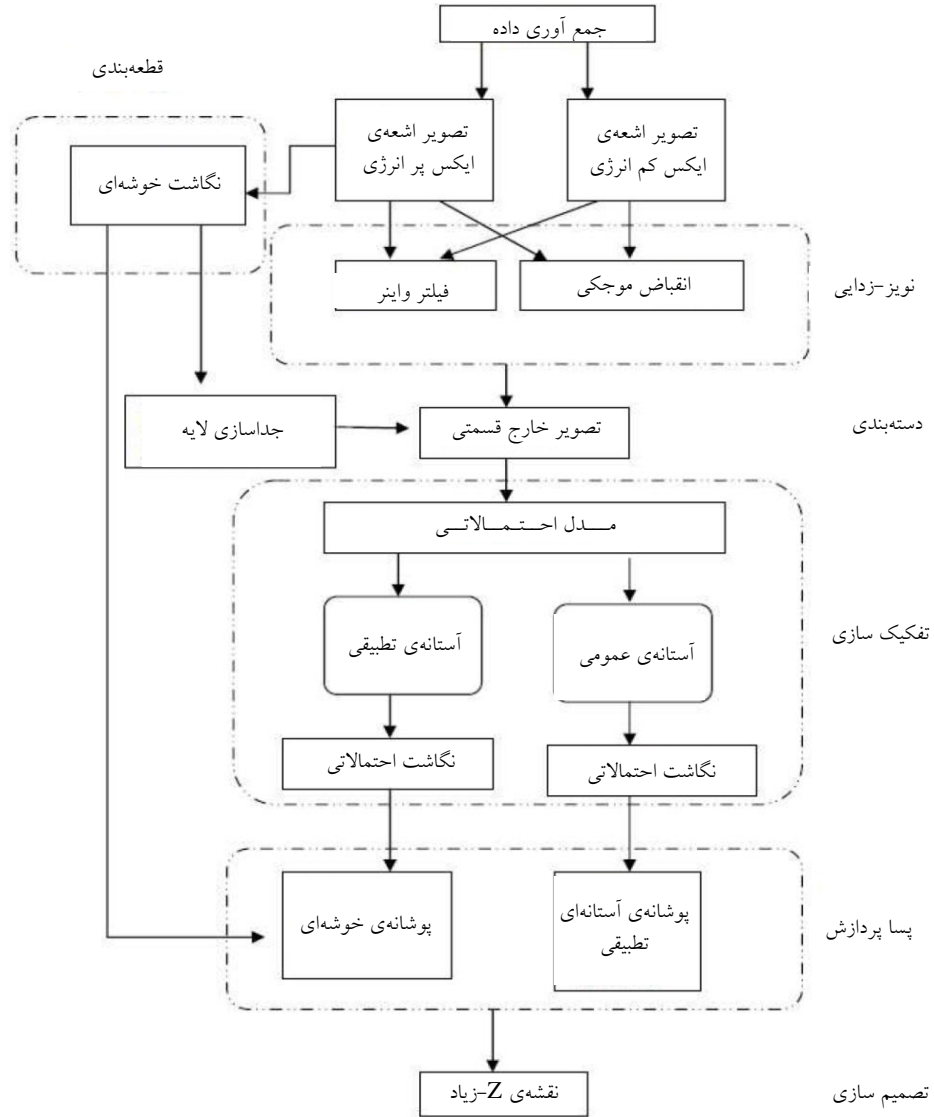
$$P_{\text{masked}}(x, y) = P_{\text{th}}(x, y)M(x, y) \quad (6)$$

که در آن $M(x, y)$ تصویر دودویی است که نتیجه قطعه‌بندی T-نگاشت است. $P_{\text{th}}(x, y)$ یک P-نگاشت قطعه‌بندی شده است که از آستانه خودکار ناشی شده است.

با مقایسه تصویر $P_{\text{th}}(x, y)$ با $M(x, y)$ ، اگر نتیجه‌ی قطعه‌بندی P-نگاشت به‌طور قابل توجهی با هر زیرناحیه در $M(x, y)$ همپوشانی نداشته باشد، آن وقت می‌توانیم بگوییم که هیچ ماده‌ای با عدد اتمی بالا شناسایی نشده است. در صورتیکه یک شیء با T-نگاشت قطعه‌بندی شده در یک ناحیه قطعه‌بندی شده با احتمال بالا بیفتد، و ناحیه‌ی قطعه‌بندی شده‌ی P بزرگتر از ناحیه یک شیء باشد. در این صورت، به‌کارگیری الگوریتم آستانه برای قطعه‌بندی $G_1(x, y)$ تا زمانی ادامه می‌یابد که هر تصویر قطعه‌بندی شده که ناحیه‌ای دارای همپوشانی بالا با یک شیء دارد پیدا شود و اندازه‌اش بسیار نزدیک به اندازه‌ی شیء بشود یا اینکه چرخه‌ی بالا به دلیل عدم وجود هیچ شیء با احتمال زیاد در ناحیه‌ی ذکر شده، خاتمه یابد.

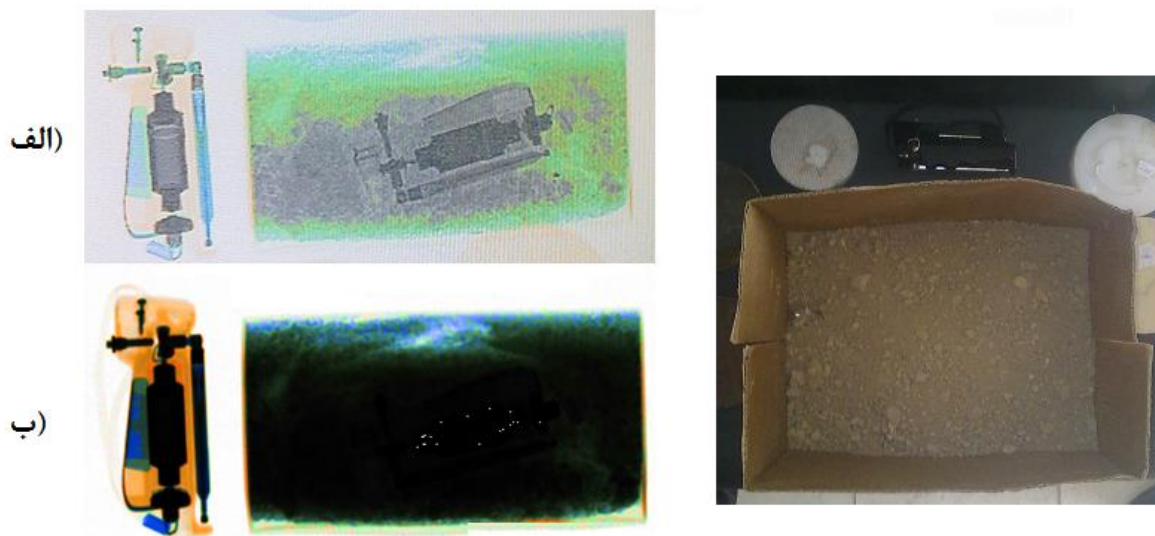
نتایج تجربی و بحث

در شکل ۳ نمودار طرح‌واره‌ی بهبود کارایی سیستم تصویربرداری اشعه ایکس دو انرژی با استفاده از الگوریتم پوشانه آستانه‌ی تطبیقی نشان داده شده است. به منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی اقدام به اجرای سناریوی تست با حضور دو ردیاب آنتی که یکی از آنها درون حجمی از خاک با ارتفاع ۲۵ سانتی متر جاسازی شده بود، گردید. ردیاب آنتی مذکور حاوی یک کپسول سربی با قطر ۱/۵cm با بدنه فولادی ۱mm است. در این آزمایش پس از اخذ ماتریس‌های تصویر کم انرژی و پرانرژی، اقدام به اعمال الگوریتم شکل ۳ بر روی ماتریس شد که نتیجه آن را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود.



شکل ۳- نمودار طرح‌واره‌ی تقویت کارایی سیستم تصویربرداری اشعه ایکس دو انرژی.

همانطور که از شکل (الف-۴) مشخص است کپسول سربی داخل ردیاب که درون حجم زیادی از خاک قرار گرفته، به خوبی از سایر مواد و اشیاء حاضر در سناریوی تست تفکیک شده است که نشان از عملکرد صحیح الگوریتم پوشانه تطبیقی دارد. شکل (ب-۴) نیز مربوط به الگوریتم تفکیک مواد در حالت بدون پردازش است که نشان از رنگی سازی صحیح تصویر دو انرژی دارد.



شکل ۴: سناریوی تست و نتایج آن؛ الف) تصویر دو انرژی پس از اعمال الگوریتم پوشانه تطبیقی، ب) تصویر الگوریتم دو انرژی بدون پردازش.

نتیجه گیری:

با توجه اهمیت کشف و آشکارسازی مواد Z -بالا که درون اشیاء Z -بالای دیگر جاسازی شده اند، در این کار اقدام به ارائه الگوریتمی گردید که با اعمال آن در الگوریتم تصویربرداری دو انرژی، قابلیت تفکیک اشیاء Z -بالا را برای دستگاه های تصویربرداری حاصل می شود. صحت سنجی این الگوریتم با اعمال بر یک سناریوی آزمایشی با حضور دو ردیاب آنتی و حجمی از خاک با ارتفاع ۲۵cm انجام شد. نتایج آزمایشی نشان از عملکرد صحیح الگوریتم های تفکیک مواد و پوشانه‌ی آستانه تطبیقی دادند.

منابع

- [1] Chen, G., "Understanding X-ray cargo imaging," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. 241, pp.810-815 (2005)
- [2] Ogorodnikov, S., Petrunin, V., "Application of High-penetrating Introspecty System for Recognition of Materials," Proc. EPAC, 2583-2585, (2000)
- [3] Ogorodnikov, S., Petrunin, V., "Processing of interlaced images in 4-10 MeV Dual-energy customs system for material recognition". Phys. Rev. ST Accel. Beams 5, pp. 104701-1-104701-11 (2002)
- [4] Ogorodnikov, S., Petrunin, V., "Processing of interlaced images in 4-10 MeV Dual-energy customs system for material recognition". Technical Report, Notpublished.
- [5] Ogorodnikov, S., Petrunin, V., Vorogushin, M., "Radioscopic Discrimination of Materials in 1-10 MeV Range For Customs Applications." Proc. EPAC, pp. 2807-2809, (2002).