

تبدیل بسط ناهمبستگی در بارزسازی تصاویر ماهواره‌ای

علی بیانی

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور
گروه دورسنجی

واضح سازی رادیومتریک (Radiometric Enhancement) در تفسیر بصری ترکیبات رنگی RGB بسیار مهم است. اصطلاح واضح سازی به معنای ایجاد تغییر در ظاهر یک تصویر است به نحوی که مفسر بتواند با استفاده از آن، اطلاعات مورد نیاز خود را بهتر و بیشتر از تصویر اصلی استخراج کند (چیکا اولمو و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های مختلفی مانند بسط کتراستر خطی یا تعدیل هیستوگرام برای واضح سازی رادیومتریک بکار می‌روند.

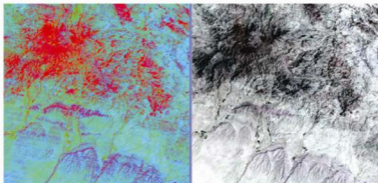
تبدیل بسط ناهمبستگی (Decorrelation Stretch) بین باندهای یک ترکیب رنگی تکنیکی برای بسط و بارزسازی بهتر اختلاف بین باندهای یک ترکیب رنگی است. عاملی که سبب شناسایی و تفکیک بهتر پدیده‌های مختلف یک تصویر می‌شود، اختلاف بازتاب طیفی آن پدیده در طول موج‌های مختلف طیف است. بنابراین انتخاب باندهایی با اختلاف بیشتر و قطعاً بسط و بارزسازی این اختلاف می‌تواند از قدرت تفسیر بالاتری برخوردار باشد. در تصویر ۱ نمونه‌ای از یک تصویر ترکیب رنگی و تصویر بسط ناهمبستگی همان ترکیب آمده است. تصویر سمت راست ترکیب رنگی RGB: 14, 12, 10 باندهای حرارتی سنجنده ASTER از محدوده مس سرچشمه است. در این ترکیب رنگی مناطق قرمز سنگ‌های غنی از سیلیس را نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ تبدیل بسط ناهمبستگی همان ترکیب است. در این تصویر سنگ‌های غنی از کوارتز به رنگ قرمز و سرخ‌های، سنگ‌های فقیر از کوارتز به رنگ آبی و ازغوانی و کربنات‌ها به رنگ سبز دیده می‌شوند.

سنجنده‌های مورد استفاده در سنجش از دور در بخش‌های مختلف طیف الکترومغناطیس به جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازند و این بخش‌ها غالباً به قسمت مرئی طیف محدود نمی‌شوند. این مسأله به این علت است که قسمت عمده‌ای از اطلاعات مفید مربوط به تشخیص و شناسایی اشیاء و پدیده‌های سطح زمین در بخش‌های غیر مرئی طیف الکترومغناطیس؛ نظیر محدوده مادون قرمز، قرار دارند.

از ترکیب ۳ باند مختلف و اختصاص هر باند به یکی از سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی (RGB)، (تصاویر ترکیب رنگی) ساخته می‌شود. ایده پشت این تکنیک ترکیب اطلاعات چند طیفی با محدوده طول موج‌های مرئی است تا برای چشم انسان قابل دید شوند.

مهمترین کاربرد ترکیب‌های رنگی در تفسیر بصری و استخراج اطلاعات به صورت سنتی است. با دانستن ترکیب رنگی بهینه و همچنین نوع سنجنده، یک مفسر با تجربه بسیاری از عوارض را بر روی تصویر تشخیص می‌دهد.

اگر تصاویر ترکیب رنگی به طور مناسب و صحیح تهیه شده و هیستوگرام باندهای استفاده شده، شباه ظاهری نداشته باشند؛ به عبارت دیگر همبستگی بین باندهای انتخابی پایین باشد تصاویر حاصله بسیار زیبا بوده و قابلیت تفسیر بصری بالایی خواهند داشت (گوپتا، ۱۹۹۱).



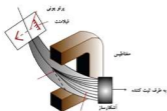
شکل ۱ - تصویر ترکیب رنگی (استر) RGB: 14, 12, 10 (چپ) - تصویر بسط ناهمبستگی آن (چپ) - محدوده مس سرچشمه

آزمایشگاه طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS)

قسمت سوم



مسئول آزمایشگاه ICP-MS
مرکز پژوهش‌های کاربردی سازه‌های زمین‌شناسی البرز



شکل ۱ - طیف سنجی جرمی بخش میدان مغناطیسی تمرکز کننده

خطی خطوط (تصاویر مربوط به اسلیت ورودی) بر روی صفحه توری نشان دهنده یون‌های با نسبت m/z به Z خاص است که توسط میدان مغناطیسی جداسازی می‌شوند. به دلیل قابلیت آشکارسازی چند عنصری و حساسیت بالا کاربرد این روش طی سال‌ها متداول بوده است. از آنجا که در این روش نیاز به استفاده از تکنیک‌های فتوگرافیکی و پردازش تصویر با دقت بالا است، کاربرد این روش چندان آسان نیست. در روش دوم از یک اسلیت خروجی با سیستم جمع کننده یونی برای اندازه گیری شدت پرتوی یونی ایزوله استفاده می‌شود. با تغییر پیوسته ولتاژ شتاب دهنده V ، و یا بزرگی میدان مغناطیسی H ، به صورت تایی از زمان، اسکن پرتوهای یونی عدد جرمی به عدد اتمی مجزا پیش از ورود به اسلیت خروجی انجام می‌شود. زمانیکه واکنش آشکارساز به صورت تابع زمانی ترسیم می‌شود، طیفی به دست می‌آید که در آن نسبت عدد جرمی به عدد اتمی متناسب با مقدار H^2 خواهد بود. پهنای اسلیت میزان تکنیک‌پذیری طیفی را در اندازه گیری‌ها کنترل می‌کند.

طیف سنج جرمی بخش میدان مغناطیسی تمرکز دوگانه

با ادغام آنالیزور جرمی بخش میدان مغناطیسی با یک آنالیزور الکترواستاتیکی (طیف سنج جرمی تمرکز دوگانه)، تکنیک پذیری سیستم به 100000 افزایش می‌یابد. در آنالیزور جرمی مغناطیسی تمرکز دوگانه از دو بخش مستقل استفاده می‌شود. علاوه بر بخش مغناطیسی

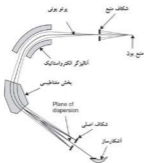
طیف سنج جرمی بخش میدان مغناطیسی

در نوع قدیمی طیف سنج‌های جرمی که نخستین بار از سوی آستون (۱۹۲۰) طراحی شده است ذره باردار از میدان مغناطیسی عبور کرده و تحت زاویه ای که با مقدار جرم و بار ذره متناسب است، منحرف می‌شوند. شعاع انحنای این انحراف به نسبت جرم به بار یون و شدت میدان مغناطیسی کاربردی بستگی دارد. از این نوع طیف‌سنج‌ها در اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی در طیف سنجی‌های جرمی مولکولی آبی استفاده می‌شود. از مزایای اصلی طیف سنج‌های جرمی با بخش میدان مغناطیسی می‌توان به قابلیت آنالیزی آنها با رنج تکنیک پذیری بالا اشاره کرد. قدرت تکنیک پذیری بیش از 10000 امکان تعیین‌های آنالیزی بدون بروز تداخل را میسر می‌سازد. از یون‌های سنگین، بدلیل حساسیت اندازه‌گیری بالا و سیگنال‌های پس زمینه پایین با استفاده از این نوع طیف سنج‌ها، حدود آشکارسازی در رنج فمتوگرم در میلی لیتر (در رنج تکنیک پذیری پایین) به دست می‌آید.

در طیف سنج‌های جرمی بخش میدان مغناطیسی، جداسازی یون‌ها برحسب نسبت جرم به بارشان انجام می‌شود. در شکل ۱، نحوه قرارگیری پرتوی یونی که به وسیله پتانسیل الکتریکی (V) شتاب گرفته و تنظیم آن به وسیله اسلیت انجام شده است، نشان داده شده است. این پرتو از لوله پرواز انحراف که بین دو قطب آهن ربای با میدان مغناطیسی قوی قرار گرفته است عبور می‌کند. نحوه قرارگیری این لوله به گونه‌ای است که مسیر پرتوی یونی عمود بر خطوط میدان مغناطیسی نیرو قرار دارد. (شکل ۱) با استفاده از تساوی زیر می‌توان انحنای تک پرتوهای یونی با نسبت عدد جرمی به عدد اتمی را محاسبه کرد:

$$r = \frac{(2Vm/z)^{1/2}}{H}$$

که در آن مقدار r نشان دهنده شعاع انحنای مسیر یونی، V ولتاژ شتاب دهنده، m مقدار جرم یونی، Z بار یون و H شدت میدان مغناطیسی است. همانطور که در این تساوی نشان داده شده شعاع مسیر یونی به جذر نسبت m/z به Z در ولتاژ شتاب دهنده و میدان مغناطیسی ثابت بستگی دارد. با استفاده از یک آشکارساز فتوگرافیکی حساس یونی، یون‌های مختلف به طور همزمان آشکارسازی می‌شوند. موقعیت

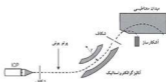


شکل ۴ - نمای شماتیک از طیف سنخ جرمی نموزکز دوگانه

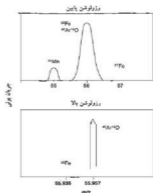
حساسیت فراوانی بیشتر در سیستم های ICP-MS استفاده می شود. در شکل ۲ مقایسه ای از طیف به دست آمده با تفکیک پذیری جرمی واحد (به وسیله یک طیف سنخ جرمی چارقطبی با نسبت عدد جرمی به عدد اتمی ۵۵ تا ۵۷) با طیف به دست آمده در رنج تفکیک پذیری بالا (طیف سنخ جرمی بخش میدان مغناطیسی با نسبت عدد جرمی به عدد اتمی برابر با ۵۶) نشان داده شده است. (شکل ۳ و ۴)

آنالیزور جرمی تله یونی

در دهه ۱۹۵۰، محققان به نام پل و همکارانش نوعی آنالیزور تله یونی چارقطبی را مطرح کردند که از آن برای به دام انداختن یون ها در یک میدان الکتریکی یا فرکانس رادیویی چارقطبی سه بعدی استفاده می شد. این تله یونی از دو الکتروود کلاهک دار با سطوح هندولنی شکل و نیز یک الکتروود حلقوی تشکیل شده است. این یون ها در تله یونی ذخیره شده و برحسب تغییر پارامترهای آزمایش مشخص می شوند. در آنالیزورهای جرمی (IT) تله یونی متداول از گاز نجیب مانند هلیم تحت فشار تقریبی ۰.۱ پاسکال استفاده می شود. یون هایی که از طریق حفره وارد قسمت کلاهک انتهایی می شوند در تله یونی نوسان پیدا می کنند. در این بخش، پایداری یون های در حال نوسان با اندازه گیری نسبت عدد جرمی به عدد اتمی یون ها، فرکانس رادیویی و مقدار ولتاژ در الکتروود حلقوی مشخص می شود. با تغییر فرکانس ژنراتور RF که موجب تحریک نوسان یون ها در تله یونی می شود، یون ها با مقادیر جرمی مختلف تدریجاً تضعیف می شوند. این یون ها پس از خروج از تله یونی آشکارسازی می شوند. طیف جرمی یون ها از تله یونی خارج شده و برحسب نسبت عدد جرمی به عدد اتمی شان که با اسکن ولتاژ RF به دست آمده است جداسازی می شوند. روش دیگر پس زدن یون ها از تله یونی، روش ناپایداری جرمی انتخابی نام دارد. در این روش، ولتاژ RF



شکل ۲ - نمایی از طیف سنخ بخش میدان مغناطیسی نموزکز دوگانه

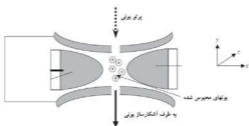


شکل ۳ - مقایسه طیف جرمی با تفکیک پذیری واحد و طیف جرمی با تفکیک پذیری جرمی

که از آن برای جداسازی یون ها برحسب نسبت عدد جرمی به عدد اتمی شان استفاده می شود. از یک آنالیزور الكتروستاتیک نیز برای فیلتر کردن یون ها بر حسب انرژی جنبشی شان صرف نظر از نسبت عدد جرمی به عدد اتمی استفاده می شود. کاربرد این دو بخش تا حدود زیادی میزان تفکیک پذیری را افزایش می دهد. زمانی که یون ها از یک آنالیزور الكتروستاتیک متشکل از لوله پرواز احجامدار در میدان الكتروستاتیک عبور می کنند، یک مسیر دایره ای با شعاع r را طی می کنند شدت میدان الكتروستاتیک را بر طبق فرمول زیر می توان محاسبه کرد:

$$\frac{mv^2}{r} = Ee$$

در این تساوی، E بزرگی شدت میدان الكتروستاتیک را نشان می دهد. البته بزرگی شعاع لحنه به میزان انرژی یون و نه جرم آن بستگی دارد. برای افزایش حد تفکیک پذیری، توزیع انرژی تا حد قابل ملاحظه ای کاهش داده می شود. آنالیزور الكتروستاتیک قبیل (ژنومتری نیر-جانسون) و یا بعد (ژنومتری نیر-جانسون معکوس) از بخش مغناطیسی فرساز می گیرد. به طور معمول از آنالیزور با فرم هندسی دوم به دلیل



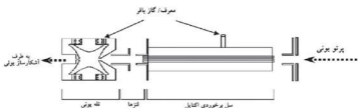
شکل ۵ - نمای شماتیک از تله یونی در جهت‌های مختلف X، Y و Z

جرمی (MS/MS) ترکیبی با گروماتوگرافی مایع و گاز (به ترتیب، LC-MS و MS) استفاده کرد. با وجود تکنیک‌پذیری بالا، از آنالیزورهای جرمی تله یونی به طور گسترده‌ای در طیف سنجی جرمی ترکیبات غیر آلی استفاده می‌شود. تأثیرات ناهم بار قضایی ناشی از حضور یون‌های پلاسما با بیشترین فراوانی در آنالیزور تله یونی موجب برخورد یون‌های درون تله و پراکنش یون‌های آنالیت مورد نظر و در نتیجه کاهش حساسیت در شناسایی یون‌های آنالیت در مقایسه با ICP-MS با ژئومتری بخش میدان مغناطیسی می‌شود.

از تله‌های یونی در طیف سنجی جرمی مواد معدنی در مطالعات پایه آبی واکنش‌های یون-مولکول بویژه کاهش تداخل‌های ایزوباریک (برای مثال، تعیین $^{90}\text{Sr}^+$ ، $^{90}\text{Y}^+$ ، $^{90}\text{Sr}^+$ برای $^{90}\text{Sr}^+$ یا $^{40}\text{Ca}^+$ و $^{40}\text{Ar}^+$) برای اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی (Ct) به روش تکنیک انتقالی برخوردی و با واکنش شیمیایی یون‌ها با آنها و یا مولکول‌های گازی برخوردی استفاده می‌شود. در شکل ۶ نحوه قرارگیری تله یونی با سل برخوردی اکتانل به عنوان بخشی از طیف سنج جرمی (PSIT) تله یونی منبع پلاسما همراه با پلاسمای جفت شده القایی و یا منبع یون تخلیه نشان داده شده است. با ورود گاز H_2 به درون سل برخوردی اکتانل که در پشت مخروط اسکیمبر (فشار تقریبی 10^{-6} پاسکال) قرار دارد، مشاهده می‌شود که مقدار یون‌های Ar^+ تا حد ۴۰ برابر کاهش می‌یابد. با معرفی گاز O_2 (با فشار تقریبی 10^{-6} پاسکال) به درون تله یونی، یون‌های

تالویه (که در مقایسه با الکتروود حلقوی فرکانس آن پایین تر است) در قسمت کلاهک‌های الکتروود ایجاد می‌شود. به این ترتیب، انرژی انتقالی یون‌های به دام افتاده با نسبت عدد جرمی به عدد اتمی افزایش یافته و این یون‌ها از تله یونی خارج می‌شوند. (شکل ۵)

با وجود ابعاد کوچکتر در مقایسه با طیف سنج‌های جرمی چارقفلی بخش میدان مغناطیسی و انتقالی فوریر، آنالیزورهای جرمی تله یونی امکان اندازه‌گیری ترکیبات آلی بزرگ مانند پروتئین‌ها و مولکول‌های زیستی (با جرم تقریبی ۱۰۰۰۰۰ دالتون) را با تکنیک‌پذیری جرمی بالا و حد آشکارسازی کمتر از ۱ میسر می‌سازند. با استفاده از یک گاز برخوردی مناسب در تله یونی می‌توان مشکلات مربوطه به بروز تداخل‌های ایزوباریک را در طیف سنجی جرمی با تکنیک انتقالی برخوردی برطرف کرد. البته پارامترهایی همچون قابلیت کمیت سنجی محدود و رنج دینامیکی پایین امکان استفاده از تله‌های یونی را محدود می‌سازد. طی چند دهه اخیر، از آنالیزورهای جرمی تله یونی چارقفلی (که با نام ۳D QIT شناخته می‌شود) همراه با تکنیک‌های یونیزاسیون همچون یونیزاسیون الکتروسپر (ESI) و یا MALDI به عنوان یک ابزار آنالیزی حساس و چند منظوره در شناسایی مولکول‌های آلی (بویژه آنالیز ترکیبات زیست مولکولی) و یون‌های با مقدار جرمی kDa استفاده می‌شود. از تله‌های یونی چارقفلی با هزینه پایین تر نیز می‌توان به عنوان آنالیزورهای جرمی با کارایی بالاتر در طیف سنج‌های



شکل ۶ - شکل ترکیبی از یک تله یونی با سل برخوردی در یک طیف سنج جرمی ICP

می‌افتد. در یک آنالیزور رزونانسی سیکلوترون یونی زمانیکه از واتژ RF استفاده می‌شود حرکت یون تحت تاثیر میدان الکتریکی بین دو صفحه ۱ و ۲ قرار می‌گیرد. واتژ در صفحات ۳ و ۴ موجب به دام افتادن یون‌ها در صفحه میانی می‌شود. مسیر منور حرکت یون‌ها در صورتی پایدار خواهد بود که نیروی مغناطیسی مرکز گسرای $F = n \cdot e \cdot v$ با بزرگی نیروی ساترفیوژ برابر باشد:

$$n \cdot e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{or} \quad n \cdot e \cdot B = \frac{m \cdot v}{r}$$

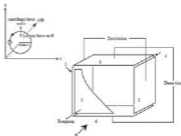
شعاع مسیر یون در تله محصور کننده با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{m \cdot v}{n \cdot e \cdot B}$$

چنانچه سرعت حرکت یون پایین باشد، شعاع مسیر یون کمتر شده و میدان مغناطیسی B افزایش پیدا می‌کند. در جداسازی یون‌ها با انرژی جنبشی بالا نیاز به میدان‌های مغناطیسی قوی است. لذا در طیف سنج جرمی FTICR از یک مغنت با قابلیت رسانش بسیار بالا (که غالباً با نیتروژن مایع و یا هلیوم سرد شده) در رنج میدان مغناطیسی بین ۳ تا ۲۴ استفاده می‌شود. (شکل ۷)

در شکل ۷ نمای شماتیک از سل رزونانس سیکلوترون یونی (تله محصور کننده) در طیف سنجی جرمی با رزولوشن بالا، ابتدا میدان مغناطیسی B تنظیم شده و یون‌ها در امتداد محور Z تزریق می‌شوند. سپس یون‌ها در امتداد این محور و در رنج واتژ مناسب به دام می‌افتند. از طیف سنجی جرمی رزونانس سیکلوترون یونی با شدت میدانی حداکثر تا ۱۵ تسلا با استفاده از سیستم پروت در اندازه‌گیری‌های طیف سنجی جرمی با ماکزیم تفکیک پذیری حداکثر تا ۱۰۶ و بالاترین میزان صحت جرمی استفاده می‌شود. یون‌های هدر جرم دارای یک بسامد سیکلوترون مشخص (ω) است. در شکل ۷ (سمت بالا چپ) حرکت یون‌های مثبت در یک میدان مغناطیسی بکنواخت نشان داده

شده است. زمانیکه یون‌ها در سل آنالیزور (تله محصور کننده) به دام می‌افتند، آنالیز جرمی با استفاده از میدان الکتریکی R_z رزونانس انجام می‌شود. این یون‌ها در میدان الکتریکی RF با بسامد رزونانس سیکلوترون شتاب می‌گیرند. سپس، در یک مسیر دایره‌ای حرکت کرده و با استفاده از صفحات ۵ و ۶ به روش آشکارسازی یونی شناسایی می‌شوند. با حرکت یون‌ها در تله FTICR و اندازه‌گیری سیگنال‌های یونی شتاب‌دار با استفاده از لگوریم انتقالی فوریر سریع می‌توان طیف‌های با تفکیک پذیری جرمی بالا را از آنلیت‌ها را به دست آورد. استفاده از طیف سنجی‌های FTICR با منابع یونی مختلف مانند nanoESI, MALDI (با منبع یون پلاسما)ی جفت شده القایی) امکان اندازه‌گیری‌های طیف سنجی جرمی را با تفکیک‌پذیری جرمی فوق بالا ($R = m/\Delta m = 10^5 \cdot 10^6$) و حد آشکارسازی بسیار پایین و بالاترین میزان صحت جرمی ($\Delta m = 10^{-3} - 10^{-6}$ Da) میسر می‌سازد. به علاوه، از FTICR-MS می‌توان در آزمایشات MS/MS استفاده کرد. در قسمت‌های بعدی دستگاهی ICP-MS دستگاهی در صورت کامل همراه با عملکرد در کنار، ارائه خواهد شد.



شکل ۷ - نمای شماتیک از سل رزونانس سیکلوترون یونی (تله محصور کننده) در طیف سنجی جرمی با رزولوشن بالا.

YO^+ و ZrO^+ نیز به طور گزینشی تشکیل می‌شوند. البته انرژی از یون SrO^+ مشاهده نمی‌شود که دلیل آن به تمین حساس ^{90}Sr بدون قابلیت جداسازی شیمیایی باز می‌گردد. (شکل ۸) روش جدید در آنالیز نمونه‌ها با رنج تفکیک‌پذیری بالا استفاده از تله‌های مداری (orbitrap) است که در سال ۲۰۰۵ مطرح شد. در این تله‌ها از یک مخزن خارجی استفاده می‌شود که قادر به تزریق سریع پالس از یون‌های ذخیره شده در آنالیزور جرمی است. به این ترتیب نیازی به صرف هزینه بالا و ایجاد شرایط نگهداری مانند آنچه که FTICR-MS ضروری است، وجود ندارد. به دلیل حساسیت و تفکیک‌پذیری ($m/\Delta m > 100000$) بالا در رنج جرمی وسیع، کاربرد تله‌های مداری در طیف سنجی جرمی رو به افزایش است.

طیف سنجی جرمی رزونانس سیکلوترون یونی

در طیف سنجی جرمی رزونانس سیکلوترون یونی (FTICR) یون‌ها از نظر فضایی محدود شده و یا در یک مسیر منور از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به دام می‌افتند. این نوع از طیف سنجی‌های جرمی از سیکلوترون‌هایی (شتاب دهنده‌های رزونانس یونی) تشکیل شده‌اند که به وسیله دو محقق به نام‌های کمپساروف و مارشال در سال ۱۹۷۴ ساخته شده‌اند. در هر دوی این تکنیک‌ها یون‌ها در یک میدان مغناطیسی بکنواخت برطبق تساوی زیر حرکت می‌کند که در آن:

$$\omega_c = zB/m$$

C برابر است با فرکانس سیکلوترون، Z برابر است با بار یون، m برابر است با شدت میدان مغناطیسی. اساس تکنیک FTICR به شیوه پالسی است به این ترتیب که یون‌هایی که به درون تله محصور کننده و در امتداد محور Z تزریق می‌شوند در یک مسیر منور و به وسیله یک میدان الکترواستاتیک در ترکیب با میدان مغناطیسی بکنواخت B به تله