

## МЕТОДИ ЗА ЦИФРОВА СИГНАЛНА ОБРАБОТКА В КОМПЮТЪРНО ПОДПОМАГАНИЯ АНАЛИЗ НА РАДАРГРАМИ ОТ ЗЕМНО-НАСИПНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

Георги Петров, Ралица Берберова

*Нов български университет*  
e-mail: gpetrov@nbu.bg, rberberova@nbu.bg

**Ключови думи:** GPR DSP, Seismic Unix

**Резюме:** Целта на настоящата публикация е да бъдат описани възможностите за използване на разнообразни стандартни инструменти и методи за цифрова сигнална обработка в процеса на анализ на радарграми от земно-насипни съоръжения. Получените илюстративни материали и експериментални резултати са свързани с изследване на реални обекти, а за целта на обработката са ползвани мощните специализирани софтуерните пакети Seismic Unix и Scilab. Акцентът е поставен върху възможностите изходните данни да бъдат вторично обработвани и визуализирани по подходящ начин, позволяващ по-лесната и бърза обработка на радарграмите, правейки по-лесно забележими възможно повече особености на радарграмата и скъсявайки времето за анализ.

## APPLICATION OF DSP IN COMPUTER ASSISTED ANALYSIS OF GPR RADARGRAMS OF EARTHFILL STRUCTURES

Georgi Petrov, Ralitz Berberova

*New Bulgarian University*  
e-mail: gpetrov@nbu.bg, rberberova@nbu.bg

**Keywords:** GPR DSP, Seismic Unix

**Abstract:** The purpose of this article is to describe the possibilities of using various standard tools and methods for digital signal processing for extensive processing and visualization of radargrams of earthfill structures. Resulting illustrative material and experimental data that are related to the investigation of real objects. For the purpose of processing we use Seismic Unix software packages and Scilab. Emphasis is placed on different visualization types of original data that allow easier and faster processing of radargrams by operator. Thus making it easier to see as many features of radargram and to shorter the total time for proper radargram analysis.

### Въведение

Изследването на малки и средно високи земно-насипни инженерни съоръжения, в частност речни диги и насипни язовирни стени, може съществено да бъде ускорено и опростено чрез използването на интегрален георадарен метод — ground penetrating radar(GPR) [2]. Методът използва технология, наподобяваща радиолокационната, със съществената разлика, че отразените електромагнитни вълни, излъчени от облъчващата антена са следствие на преминаването на електромагнитната енергия през подповърхнинни слоеве с различна диелектрична проникваемост. Методът може да бъде използван за заснемане на различни дълбочини в зависимост от използваната работна честота на георадара [9], а също така и според изследвания материал [10] (пясък, почва, глинести почви, скална маса и др.). При това колкото по-дълбоко е интересуваният ни обект, толкова по-ниска се получава пространствената разделимост и влиянието на отразени паразитни сигнали, получени от близкостоящи и стоящи над изследваната точка обекти, е по-силно. Особеностите на метода го правят атрактивен избор при изследване на малки и средно високи земно-насипни съоръжения,

каквито са речните диги и земно-насипните язовирни стени. Този метод е много по-елементарен от класическите пенетрационни и сондажни изследвания на обекти; спестява време и ресурс на скъпа техника, същевременно е абсолютно безопасен и екологосъобразен [3]. Чрез георадарния метод, в зависимост от достъпността на конкретното инженерно съоръжение, е възможно да се снее относително подробен профил на вътрешна му структура. Последващият визуален анализ на радарграмите позволява на експертите да откриват структурни нарушения (свличания, проникване на влага, повреди в подземната инфраструктура — отходни канали, водостоци и т.н.). При наличие на подходяща техника анализът на данните може да става и в момента на самото изследване. За създаване на конкретен визуализиран модел на даден обект, освен резултатите от георадарните изследвания, е необходимата техническата документация на обекта. Дори при липсата ѝ, при едно детайлно георадарно заснемане на обектите и оглед на терена е възможно да бъде построен достатъчно точен 2D и 3D модел, отразяващ актуалното състояние на терена и структурата на обекта. В процеса на георадарните изследвания на обектите и най-вече при последващия анализ участват високо квалифицирани кадри. Методът не може изцяло да бъде автоматизиран и изисква наличието на експертно мнение за оформяне на комплексната оценка за качеството, безопасността и конструктивната цялост на обектите. Конкретният процес на анализ на радарграмите използва разнообразни методи за компютърна визуализация на 2D и 3D радарграми, показващи различни профили и напречни срезове. Поради спецификата на данните и динамиката на информацията в самите радарграми се използват някои класически методи за пост-обработка и последваща визуализация на вече записаните данни [1]. Основен недостатък на този подход за анализ е необходимостта операторът, гледащ радарграмите да притежава съществен опит, за да може да избере такива параметри на визуализация, а и първоначална настройка на системата за избор на работни честоти, антени и дълбочина, при които да са видни важни структурни елементи в радарграмата. Това се постига чрез практически опит и предвид новостта на радарния метод се предполага, че към настоящия момент количеството обучени експерти е крайно малко (няколко десетки за цяла България). Съществуват и други практически проблеми - при използването на различни модификации на оборудването съществува възможност радарграмите от един обект да изглеждат различно, което също така налага и някои ограничения и изисквания за регулация на този вид дейности [4]. За да се ускори процеса на обучение на кадри и същевременно да се подобри възможността този метод да бъде масовизиран, считаме, че от съществено значение е ползваните компютърни системи да позволяват моментално визуализиране на възможно повече съществени особености заснети в радарграмите с възможност за тяхното аотиране и съхранение. Това налага да бъдат използвани стандартни методи за цифрова сигнална обработка и представяне на сигнала в негови различни измерения (времево-пространствени или честотни и др.), като при това се позволи едновременна визуализация на възможно повече характерни особености за един и същи изследван сегмент от радарграмата.

### **Проблеми при обследване на земно-насипни съоръжения с георадар**

При болшинството дейности, свързани с инспекция на инженерни съоръжения (постройки, диги, насипи под пътища [7] и др.), от особено значение е наличието на техническа документация за обектите (чертежи, снимки от етапите на изграждане, коментари, данни за ползваните материали и др. информация за правени ремонти и т.н.). Данни за основния материал са важни предвид възможността да бъде избрана по-добра антена и работна честота на георадара. При отсъствие на подобна информация може да бъдат ползвани геоложки карти, представящи повече информация за различните видове почви в района на обследвания обект. Предвид факта, че повечето строежи на земно-насипни и скално-насипни речни диги, язовирни стени и насипи за пътища са били правени преди 25 - 30г. наличието на необходимата конструктивна информация и данни за ремонти и др. дейности, свързани с експлоатацията на съоръженията, са или трудно откриваеми, или изобщо не са налични. Възможно е по време на експлоатацията немалка част от земно-насипните съоръжения в страната ни да са били в неизправност и да са се налагали, на да не са били камествено изпълнени ремонтни дейности, ненавременен източвани или неконтролирано пълнени. Всички тези фактори налага при първичния оглед на конкретните съоръжения да бъде събрана и допълнителна информация. Външната визуална инспекция също би показала много относно експлоатацията и поддържането на обектите в един средносрочен период назад (наличие на прорастли дървета, дънери на стари дебели дървета, свличания, слягания и др.). При този първичен оглед операторите следва да изготвят подробна визуална документация на обекта, чрез засичане на координатите на интересуващите ги обекти, заснемане с цифров фотоапарат, маркиране на визуално отчетени нередности по обекта. Този архивен материал ще подпомогне последващия

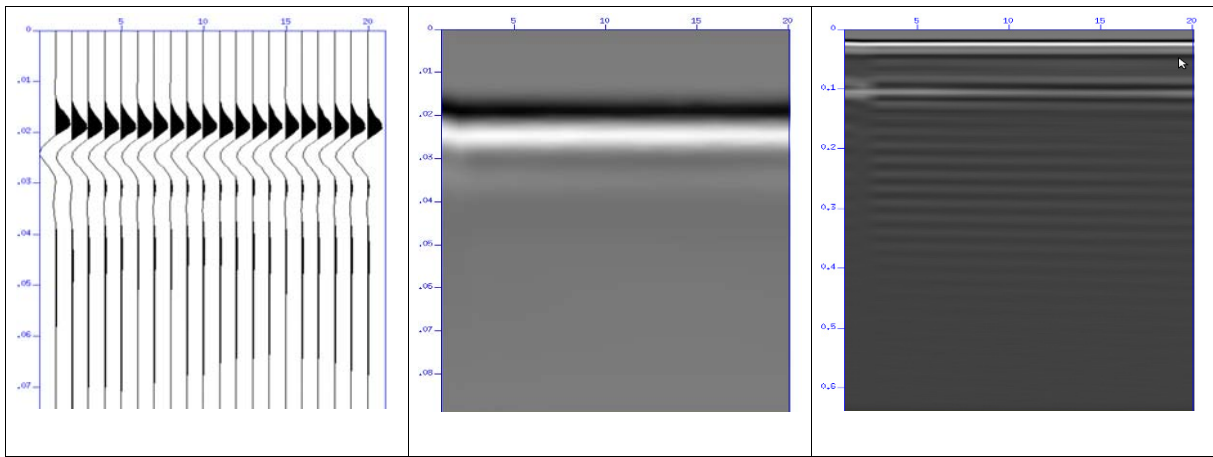
анализ на направените радарграми. Възможно е предвид лошата поддръжка конкретно да не е достъпно заснемане с георадара на цялата интересуваша ни повърхност. Визуалната инспекция на обекта извън летния сезон, когато растителността е обезлистена, позволява да бъдат забелязани «скрити» свличания или пропадания, невидими през летния сезон.

Също така при особено високи структури би било възможно дълбочинно радарно изследване чрез направа на сондажни шахти през определено разстояние, като в тях биват спускани излъчвателна и приемателна антени. По този начин подобно на импедансният томографски анализ, но доста по-точно, би могло да се засечат обекти и изменения на целостта на съоръженията с много висока точност и позициониране.

При всички тези случаи възможността да се използва специализирана геоинформационна система е от решаващо значение за масовизацията на метода и конкретно за събирането на статистически данни за конкретни обекти. Подобна система би следвало да притежава опции за отдалечен достъп, качване и сваляне на информация за интересоващите ни обекти, а също така и възможност за визуализация на предварително селектирани данни (радарграми, снимки на терена, сателитни и аеро-снимки и др.). Поради спецификата на работата особено внимание следва да се отдели на възможностите за визуализация на данните, с които системата ще разполага (2D или 3D) с възможност за ползване на т.н. «augmented reality», при която става възможно съпоставянето на външно заснетия терен с реалния компютърен модел на структурата на обекта. Подобни модели могат да бъдат развити и в темполарен модел, при който да се проследява състоянието на обследвания обект във времето. Естествено, подобен интегриран подход изисква наличието на съществени инвестиции, но това не пречи при неговото концептуално създаване да се ползват методи за цифрова обработка, визуализация, бази данни и уеб технологии, позволяващи разгръщането на подобна геоинформационна система в нейния пълен потенциал (система с отворени интерфейси).

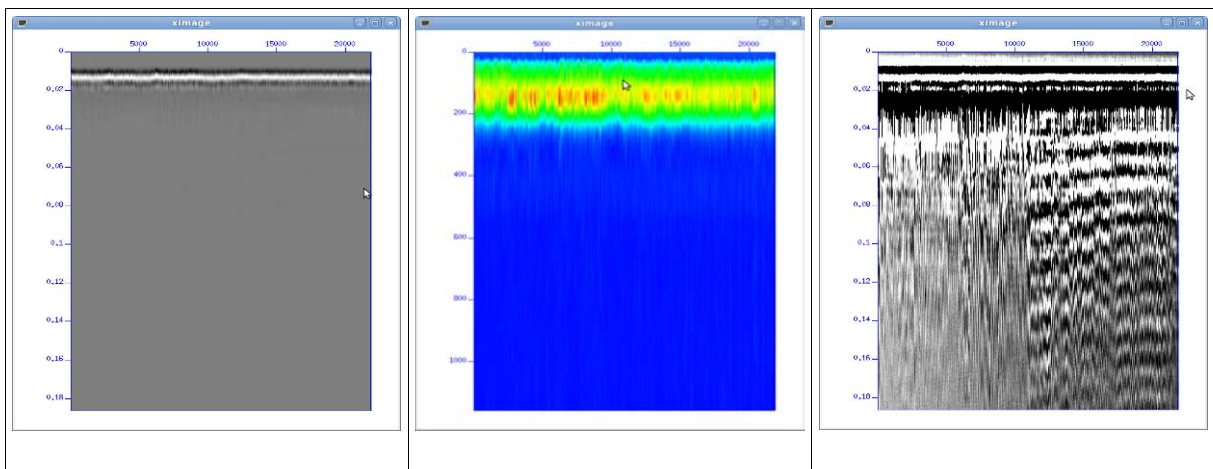
#### **Основни методи за обработка на радарграми**

Данните се записват в тяхната времева област, като в последствие серии от поредни измервания могат да бъдат обединени в 2D изображение, даващо информация за дълбочината на проникване и отстоянието между отделните поредни измервания. В този процес на обработка активно се ползват цифрови методи за усилване, филтрация и многокомпонентен анализ на записаните радарграми. Що се касае до фундаменталните прийоми за обработка на радарграмите в литературата съществуват някои постулиращи заглавия, описващи предварителна обработка на радарграмите, предшестваща визуализацията им: Yilmaz, O. 1987г. [5], Fisher 1992г. [6], Majjala 1992г. [8] и др. Исторически визуализацията на радарграмите е ставала или чрез отпечатване, или чрез изобразяване на екран. Поради несъвършенствата на компютърната техника, радарграмите са били визуализирани чрез т.н. «wiggly trace» - вертикални вълнички, на които положителната амплитуда на осцилограмата се визуализира чрез запълване, а отрицателната е празна (Фиг. 1.а). Възможностите за разпечатване и визуализация в 8 битов режим съществено подобряват работата с радарграмите (Фиг. 1.б). До появата на цветните принтери и монитори, а и след това, възможностите за визуализация на радарграмите с техните пълни детайли, без предварителна обработка, остава технически невъзможно. Това се дължи на спецификата на записания сигнал. Отраженията на сигнала, регистрирани от обекти близо до повърхността, са с многократно по-висока амплитуда, отколкото нивата на сигнала, отразен през преминаване в по-долните пластове (от няколко порядъка). Това поставя минималното изискване пред всяка една подобна система за визуализация да има функции за автоматично регулиране на усилването на записания или приеман сигнал, така че визуализираната радарграма да бъде достатъчно представителна, за да позволи на оператора да я анализира, отчитайки малки подробности в образа (Фиг. 1.в).



Фиг. 1 — а) Визуализация на радарграма с wiggle trace (вълнички), б) 8 битов монохромен монитор или принтер, в) монохромен монитор с усилване на сигнала

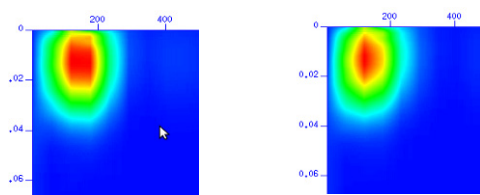
Тъй като радарграмата дава информация относно отражението на електромагнитните вълни при преминаване от слой в слой, тя може да бъде анализирана и филтрирана в нейната честотна област. Едни от най-простите филтри са осредняващия нискочестотен филтър и медианния (3-5 елементен) филтър за изчистване на импулсен шум. И двата типа филтри са приложими при последователна обработка на всяко едно измерване - 1D или при обработка на полученото 2D изображение на радарграмата. В зависимост от сложността на задачата е възможно да бъдат използвани и лентови филтри, имащи за цел по-добре да се визуализират структури с определени дебелини. Тук може да бъде приложен корелационния анализ и автокорелационни анализ за детекция на аномалии между отделните пенетрации. Съвременният подход обикновено се свежда до FFT филтрация (евентуално за отстраняване на шумове причинени от смущения), тъй като тя е по-бърза и по-прецизна в сравнение с класическия подход на последователно обхождане на данните. Филтрацията на радарграмите в повечето случаи се извършва само по вертикалата, като на един и същи метод за филтрация биват подлагани поотделно всички масиви данни, съдържащи стойности за отделните измервания, които може или не са предварително подложени на усилване (усилването не е линейна функция съобразно дълбочината и може да се осъществява по различни начини). По-сложни алгоритми от обработката на изображения могат да бъдат ползвани в последствие и особено при 3D реконструкцията. Крайната цел на процедурите по филтрация са определени интересувачи ни обекти да бъдат по-добре визуализирани и съответно открити, което означава, че данните не би следвало да претърпяват драстични изменения в процеса на обработка, при която се цели филтрация — отстраняване на предполагаемо паразитно ехо и шумове.



Фиг. 2. Оригинална радарграма-вляво, нейната спектрална карта - по средата и усилено оригинално изображение

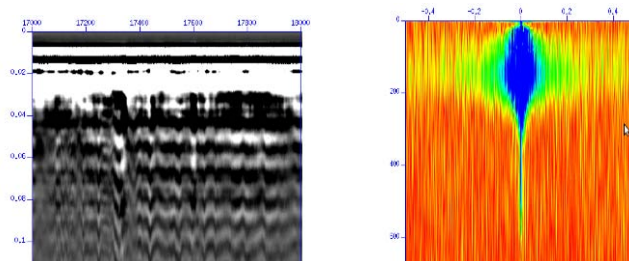
## Комплексни техники за обработка на радарграми

Възможностите, които съвременните цифрови компютри предоставят, позволяват да създаваме комплексни радарграми, заснети чрез ползване на мултиспектрални антени, предоставящи информация с различна темпорална (дълбочинна) и пространствена детайлност. Това изисква радарграмите да бъдат унифицирани (разпънати и нормирани по дълбочина и ширина), а след това цифрово насложени. В този процес се използват методи за автоматично екстраполиране и сфазирание на образите, с цел постигане на по-ясна картина в дълбочина на обследвания обект. И тук болшинството методи залагат на обработка в комплексното честотно пространство. Един популярен метод за визуализация на честотно представената информация в отделните измервания е чрез ползване на „Габор“ трансформация, при която добре се визуализират честотните пикове по дълбочината на цялата пенетрация (Фиг. 2). Тези 2D изображения на изходния сигнал могат в последствие да бъдат сравнявани една с друга отделните измервания. Например, така по-лесно може да бъдат търсени позиции в радарграмата, имащи сходна информация в честотното пространство съобразно дълбочината.



Фиг. 3. Габор трансформация на съседни измервания, ясно се вижда различието между честотните съставки на сигнала в зависимост от дълбочината

Особено популярни са методите за обработка с т.н. „малки вълни“ („wavelet“) трансформации, обикновено изпълнявани за елементи на интересуващия ни сигнал, съдържащи до 100 точки. Друг метод е т.н. „Fourier transform over time - Fourier transform over space“ (FK честотна трансформация по време – дълбочина на проникването и дължина на радарграмата) (Фиг. 3).



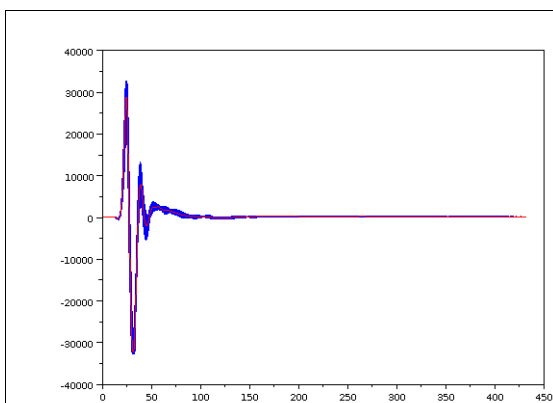
Фиг. 4. Оригинален сегмент от радарграма - вляво, и неговата FK трансформация - вдясно

FK обработката позволява да се визуализират прави и наклонени прави черти, като извивки (свличания на слоеве) или отражения от големи обекти се визуализират като замъглено пространство. Този начин позволява да се филтрират едночестотни компоненти на сигнала, слизащи и изкачващи се в дълбочина на радарграмата. Друг интересен, но ограничен подход, е използването на „Радон“ трансформация, при която входните данни се декомпозират обикновено на набори параболи и хиперболи. При всички тези методи за обработка анализът е възпрепятстван основно от наличието на „шумове“ от множество вторично отразени затихващи във времето сигнали или пък поради индуктивността на средата, причинена от различни фактори.

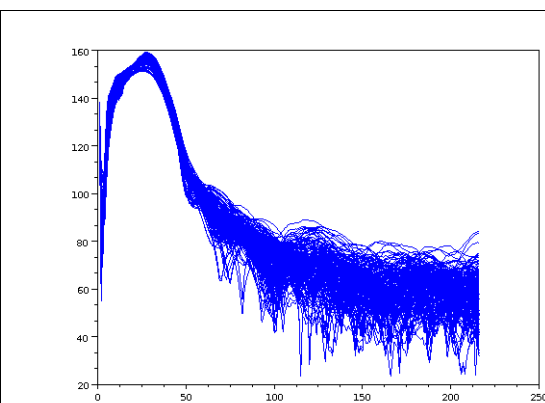
## Визуализация

Визуализацията на радарграмите в повечето случаи е най-удобно да се прави чрез оцветявания на екранните изображения. Въпреки това поради голямата динамика на сигнала големи области на радарграмата остават неясни за оператора. След подходяща филтрация и усилване данните могат нагледно да бъдат визуализирани, като инспекцията може да става на няколко етапа чрез подбор на различни филтри, усилватели и резолюции (наблюдение на радарграми, получени чрез обединяване на данни от 2 и повече антени, работещи на различни честоти). Поради факта, че конкретната радарграма може да съдържа едни или други визуални

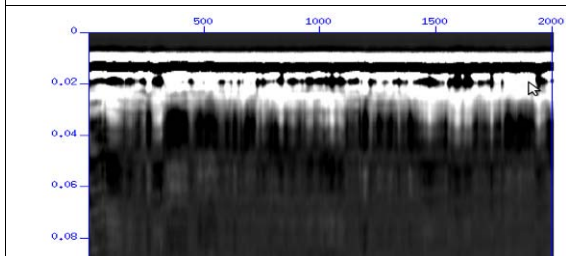
елементи, които в зависимост от ситуацията и конкретния обследван обект да имат различно значение не е възможно да бъде напълно автоматизиран процесът по първоначална обработка на радарграмите, като чрез подходящи компютърни програми това може да бъде сериозно подпомогнато и ускорено. Една добра система позволява едновременния преглед на цялата радарграма с възможност за превключване на различни филтри, едновременно наблюдение на спектъра на радарграмата, както и някои негови разновидности конкретно за интересувачи ни нейни сегментни елементи. Специфично за земно-насипните съоръжения е тяхната конструктивна хомогенност, т.е. те следва да имат ясно изразена слоеста и еднородна структура по цялата си дължина. В този случай пропадания, слягания и други аномалии биха могли по-лесно да бъдат открити чрез софтуер, подпомагащ визуализацията на едни или други аномалии (отклонения от средните стойности за цялата радарграма) (Фиг. 5). Чрез подбор на различни филтри и екранни визуализации съществено би могла да се повиши ефективността на работещия експерт, като така същевременно му се даде възможност да обърне внимание върху повече особености в радарграмата (състояща се често от десетки хиляди отделни измервания в няколко плана), отколкото, ако той извършва този първоначален преглед в ръчен режим.



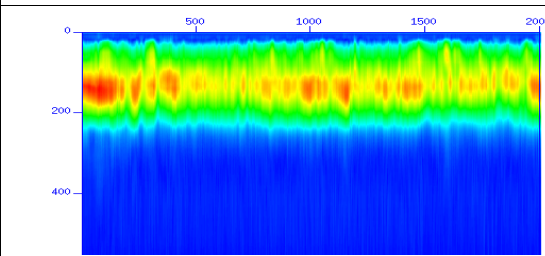
5.1 Насложени и осреднена стойност от 2000 поредни измервания



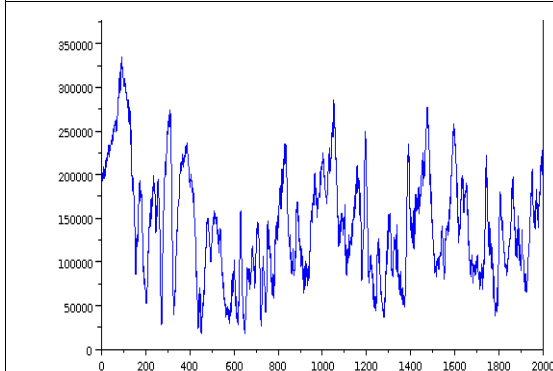
5.2 Насложен спектър на отделните поредни измервания



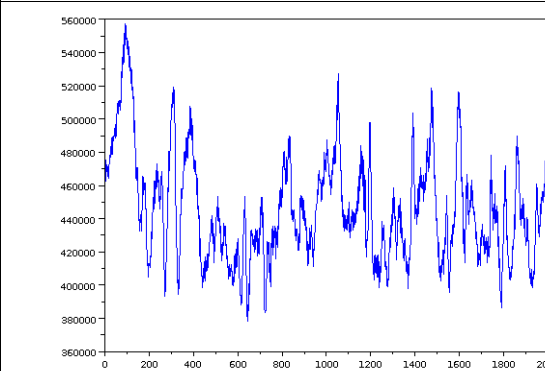
5.3 Усилен сигнал на радарграмата



5.4 Визуализация на спектралната карта на радарграмата



5.5 Средно квадратично отклонение от осреднения сигнал



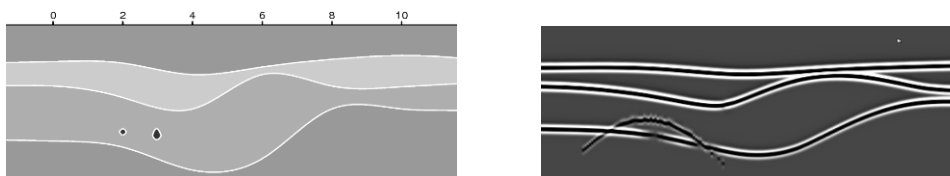
5.6 Сумарно ниво на детектираните амплитуди за отделните измервания

Фиг. 5. Визуализация на вариациите на оригиналния сигнал и честотния му спектър, използвани при подпомагане и първоначално маркиране на потенциални позиции на аномалии в структурата на изследваното съоръжение

Пиковите в спектралната карта на радарграмата (спектрите на отделните измервания) еднозначно съответстват на позиции с голямо отклонение на сигнала от средните му стойности за зададен интервал. Едновременно с това честотният и амплитудният спектър на сигнала съществено се различава във висшите хармонични, с изключение на случаите на големи аномалии директно в подповърхнинния слой. За конкретни интересувачи ни сектори на радарграмите е допустимо да бъдат изчислявани съответно изображения на FK и Радон трансформациите, които да подпомогнат филтрацията и визуализацията на труднозабележими хоризонтални, наклонени и параболични очертания.

### Моделиране

Възможността да бъде използвано симулационно моделиране за получаване на виртуални радарграми за даден обект, чиито сравнителни физически параметри познаваме, ни позволява да извършваме приблизително сравнение на реално получените радарграми с идеализираните симулации. При условие, че за конкретното земно-насипно съоръжение са известни данни за вътрешната му слоеста структура, използваните инертни материали, позициите и приблизителните физически размери на подземната инфраструктура, използването на симулационен модел съществено ще улесни процеса на обследване на обекти чрез GPR метод в частта откриване на проблеми в целостта на земно-насипното съоръжение (Фиг. 6).



Фиг. 6. Модел на надлъжен разрез на земно-насипна дига и нейната симулационна радарграма. Целта е да се визуализират детайли на радарграмата, показващи специфични инфраструктурни особености на дигата

### Заклучение от проведените експерименти

Проведеният експеримент за използване на разнообразни компютърни методи за времево-пространствена обработка на радарграми при обследване на земно-насипни съоръжения (диги и язовирни стени) ни позволява да направим следните обобщения за приложимостта и достъпността на GPR технологията:

- поради височината на земно-насипните съоръжения, обект на настоящето изследване (до 15-17 m, стени на микроязовири и речни диги) и своята сравнително еднотипна конструктивна структура (сравнителна хомогенност на използвания материал и метода на изграждане), тези съоръжения могат да бъдат изследвани чрез георадарен метод;
- GPR методът е особено подходящ при създаване на референтни изображения в процеса на изграждане на нови съоръжения, като в този случай провеждането на периодични заснемания на обекта чрез съпоставка на радарграмите заснети в различни периоди могат еднозначно да бъдат открити изменения във вътрешната структура (свличания, кухини, просмукване на вода и др.);
- при използване на метода за обследване на стари малки и средновисоки земно-насипни съоръжения, методът задължително трябва да бъде съпроводен с визуална инспекция на обекта, събиране на допълнителна налични информация и по възможност достъп до техническата документация за обекта, а където това не е възможно - да бъдат събрани данни от местното население или обслужващ персонал за състоянието на съоръжението, евентуални ремонти или повреди във времето.

Независимо от наличната информация за обектите, следва да бъде обмислена възможността за създаване на достатъчно точен компютърен модел на изследвания обект (когато конструктивните чертежи са налични) или частично възстановими от съответните специалисти. Така построеният приближен модел следва да отразява основните инфраструктурни особености на съоръжението — канали, шахти, тръби, каменни насипи, бетонни тунели и др. Чрез георадарния метод могат да бъдат констатирани вътрешни пукнатини или пробив на вода. Компютърният модел бива подложен на симулативен георадарен експеримент, при който се изчислява сравнително достоверен образ на

радарграмата, съдържащ основните конструктивни елементи на обекта. Симулационната радарграма на обекта може да бъде съпоставяна с реално получената радарграма, като така значително се подпомогне процесът на детекция на потенциални аномалии. Този метод се препоръчва и при построяване на модели на нови съоръжения, данни за чиято структура и цялост притежаваме. Така създаденият модел по реални данни може да бъде ползван в процеса на подобряване и моделирането на земно-насипни съоръжения, за които нямаме налични конструктивни чертежи или допълнителна информация за тяхната цялост.

При анализ на радарграмите от подобни съоръжения се предполага, че имат относително хомогенна и предполагаема структура. Това от една страна би улеснило анализа им, но следва да се има предвид, че терена, върху който съоръженията са изградени, е възможно да бъде с различна морфология, дълбочина и да има особености, даващи отражение върху радарграмата. В повечето случаи се търсят нехомогенности, наклонени вълнови образи и т. н. За да се улесни този процес, е предложено данните да бъдат визуализирани в тяхната времева и честотна област, като за подпомагане работата на оператора бъдат извеждани и графики на максималните отклонения от осреднения сигнал и максималните отклонения от осреднения спектър за цялата или сегмент на радарграмата. Пиковите в тези графики еднозначно показват за наличие на резки отклонения. Друг подход е да бъде визуализирана подобна графика, съдържаща стойности на интегралното ниво на сигнала от всяко измерване, което поради хомогенността на съоръжението съответства по пикове и форма на графиката на средно квадратичното отклонение от нормирания сигнал за дадена последователост. В отделни позиции, където има предположение за обекти, кухни, тръби, шахти, овлажняване и др. аномалии от общата структура, може да се използват визуализации на ГК или радон трансформирани изображения. Също така в процеса на автоматизирано маркиране е възможно да бъдат извеждани най-значимите отклонения под формата на единични измервания или техните Габор спектрограми. При провежданите първоначални експерименти не се експортират точните данни за размерностите на данните за вълните, като при това те се обработват с абсолютни координати и брой измервания. В бъдеще при реализация на уеб базиран фреймуърк ще бъде изобразявани и тези данни. Направените заключения от проведените първоначални експерименти за обработка и визуализация на радарграмите са използвани при създаването на концептуален фреймуърк, използващ като база функционалностите на системата Seismic Unix с възможности за отдалечен уеб достъп, подпомагащ работата на анализатора.

**Благодарности:** Настоящата работа е осъществена с финансовата помощ на ФНИ към МОМН (договор ДФНИ-М01/9/22.11.2012 г.).

#### **Литература:**

1. P.A.P. Annan, Practical Processing of GPR Data, 1999, Sensors & Software Inc., Sensors & Software Inc. Proceedings of the Second Government Workshop on Ground Penetrating Radar
2. Jeffrey, J. Daniels, Ground Penetrating Radar Fundamentals, Department of Geological Sciences, The Ohio State University Prepared as an appendix to a report to the U.S.EPA, Region V Nov. 25, 2000
3. Raimond GRIMBERG, Rozina STEIGMANN, Nicoleta IFTIMIE, Adriana SAVIN, 6th NDT in Progress 2011, International Workshop of NDT Experts, Prague, 10-12 Oct 2011, Ground Penetrating Radar as tool for nondestructive evaluation of soil, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania
4. European GPR Association, <http://www.eurogpr.org/>
5. Yilmaz, O. 1987. Seismic Data Processing. SEG.
6. Fisher, E., McMechan, G., Annan, A., and Cosway, S. (1992). "Examples of reverse time migration of single channel, ground penetrating radar profiles." *GEOPHYSICS*, 57(4), 577–586.
7. Scullion, T., Saarenketo, T. Ground Penetrating Radar Technique in Monitoring Defects in Roads and Highways. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1995: pp. 63-72.
8. Majala, P., 1992: Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data, Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar June 8-13, 1992. Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 16, 365 pages.
9. Reinaldo Alvarez Cabrera, GPR Antenna Resolution, GEOSCANNERS AB
10. Ground Penetrating Radar Survey Design, 1992-1999, Sensors & Software Inc., [www.sensoft.on.ca](http://www.sensoft.on.ca)