

# ZPRACOVÁNÍ DAT Z RADARU GPR

## GPR DATA PROCESSING

Martin Šafařík<sup>1</sup>

*Anotace: Článek popisuje obecný princip impulsního GPR radaru, který se používá například při diagnostice vozovky. Dále je uveden jednoduchý příklad měření, který je dále simulován. Získána data jsou zpracována a vhodně zobrazena.*

*Klíčová slova: GPR, georadar, migrace, zpracování dat.*

*Summary: This paper deals with general principle of impulse GPR radar, which is used to roadway diagnostics. An example of measurement is introduced and simulated. Simulated data are processed and imagined by appropriate imaging method.*

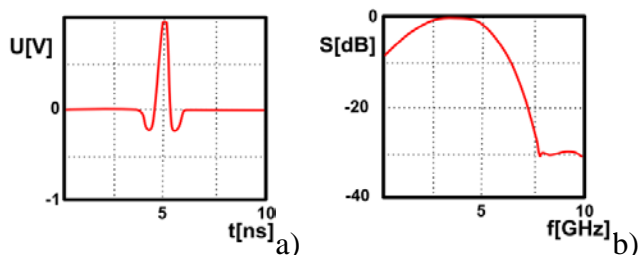
*Key words: GPR, migration, data processing.*

### ÚVOD

Nedestruktivní diagnostika struktury pevných materiálů je velmi zajímavou oblastí elektrotechniky. Zařízení, která slouží pro tuto diagnostiku, označujeme jako GPR (Ground Penetrating Radar) nebo georadary. Georadar vysílá do zkoumaného materiálu elektromagnetické vlnění, které je odraženo od nehomogenit v materiálu. Odražené vlnění je následně zachyceno a na základě signálového zpracování je sestaven přibližný obraz vnitřní struktury zkoumaného materiálu. Vhodnou variantou pro realizaci georadaru je ultraširokopásmová technologie (ultra-wideband technology, UWB). V příspěvku je vytvořena jednoduchá simulace GPR systému, která ukazuje snadný způsob získání testovacích dat. Výsledky simulace jsou zpracovány metodou, která významně zlepšuje přesnost lokalizace nehomogenit v materiálu.

### 1. UWB TECHNOLOGIE

UWB impuls je definován jako signál, jehož absolutní šířka pásma je větší než 500 MHz, pro pokles 10 dB (1). Na Obr. 1 vidíme v levé části průběh normovaného napětí impulsu v závislosti na čase. Šířka znázorněného impulsu je přibližně 500 ps. Pravá část obrázku ukazuje stejný UWB impuls ve frekvenční oblasti.



Zdroj: Autor

Obr. 1 - UWB impuls. Časová oblast (a), frekvenční oblast (b)

<sup>1</sup> Ing. Martin Šafařík, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektroniky, elektrotechniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 53210 Pardubice, E-mail: [martin.safarik@student.upce.cz](mailto:martin.safarik@student.upce.cz)

Velmi úzké impulsy UWB technologie znamenají vysokou rozlišovací schopnost v dálce. Tato rozlišovací schopnost je určena dle vztahu (1).

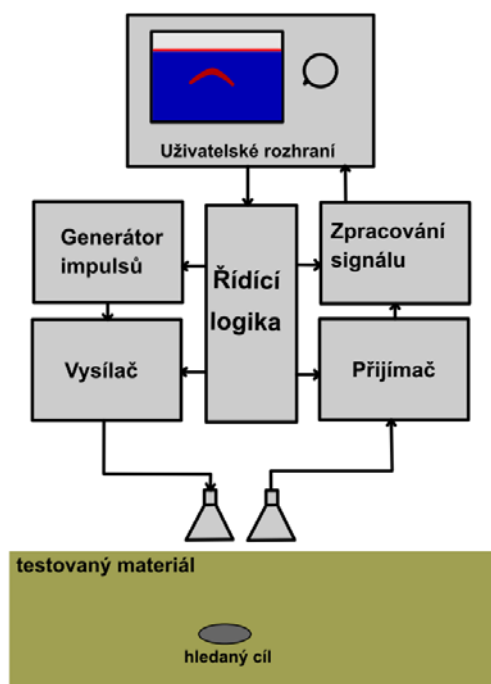
$$\Delta R = \frac{\tau_i \cdot v}{2} \quad (1)$$

kde  $\Delta R$  je rozlišovací schopnost,  $v$  je rychlost elektromagnetické vlny v daném prostředí a  $\tau_i$  je šířka vysílaného impulsu. Rozlišovací schopnost je tedy přímo úměrná šířce impulsu a pro UWB technologii se pohybuje v řádech jednotek centimetrů. GPR radary, které jsou na technologii UWB založené, jsou tedy vhodné pro přesnou detekci relativně malých anomálií ve zkoumaných materiálech. Běžně dosažitelná šířka impulsů v UWB technologii je v řádech stovek pikosekund (2).

## 2. SYSTÉM GPR

### 2.1 Popis GPR systému

Systém GPR se nejčastěji navrhuje jako bistatický (3), na vysílání a příjem se používají dvě oddělené antény. Antény se často umísťují natolik blízko, že při zpracování dat lze počítat s tím, že jde o monostatický systém s jedinou anténou. Na Obr. 2 je blokové schéma typického impulsního GPR systému. Uživatelské rozhraní obsahuje displej a ovládací prvky. Uživatel ovládá řídicí logiku systému, která spouští generátor impulsů. Impulsy jsou přes vysílač přivedeny na vysílací anténu. Elektromagnetická vlna putuje od antény do testovaného materiálu, kde se odrazí od jeho povrchu a také od jakýchkoliv nehomogenit materiálu. Tato odražená vlna je zachycena přijímací anténou. V přijímači je odražený impuls vzorkován a kvantován a veden do jednotky zpracování signálu. Po zpracování je na displeji zobrazena poloha hledaného cíle.



Zdroj: Autor

Obr. 2 - GPR systém, blokové schéma

Hlavním parametrem radaru GPR je vysílací frekvence. Převrácená hodnota této frekvence odpovídá šířce vysílaných impulsů a ta určuje, jak velké cíle jsme schopni detekovat. Se zvyšující se vysílací frekvencí se však vlivem útlumu zkoumaného materiálu zkracuje dosah radaru. Dosah lze pak do jisté míry prodloužit pomocí zvyšování vysílaného výkonu. Většina vysílaného výkonu elektromagnetického vlnění se však nejprve odrazí od povrchu zkoumaného materiálu, což může způsobovat přebuzování přijímače. Dosah radaru také velmi závisí na vlastnostech zkoumaného materiálu, jako je například relativní permitivita či měrná vodivost. Tyto vlastnosti jsou mimo jiné závislé na obsahu vody, hustotě, apod. S rostoucí permitivitou se rychlost šíření elektromagnetické vlny v materiálu snižuje. Abychom mohli detekovat nějaký cíl uvnitř zkoumaného materiálu, je nutné, aby cíl měl různou hodnotu permitivity nebo měrné vodivosti, než okolní materiál a aby měl také dostatečně velkou odraznou plochu.

Tab. 1 obsahuje některé používané frekvenční parametry GPR radarů a jím odpovídající minimální velikosti detekovatelného cíle a hloubkový dosah radaru. Je zde vidět, že se zvyšující se frekvencí se zvyšuje možnost detekování menších cílů, ale dosah se zkracuje. Například 50MHz radar detekuje cíle o průměru 50 cm ve vzdálenostech 5 až 20 m pod povrchem materiálu. Uvedené hodnoty platí pro běžnou zeminu (4).

Tab. 1 - Používané střední vysílací frekvence radarů GPR

Frekvence[MHz]	Průměr cíle[cm]	Hloubkový dosah[m]
50	50	5-20
100	10	2-15
500	4	1-5
1000	1	0,3-2

Zdroj: (4)

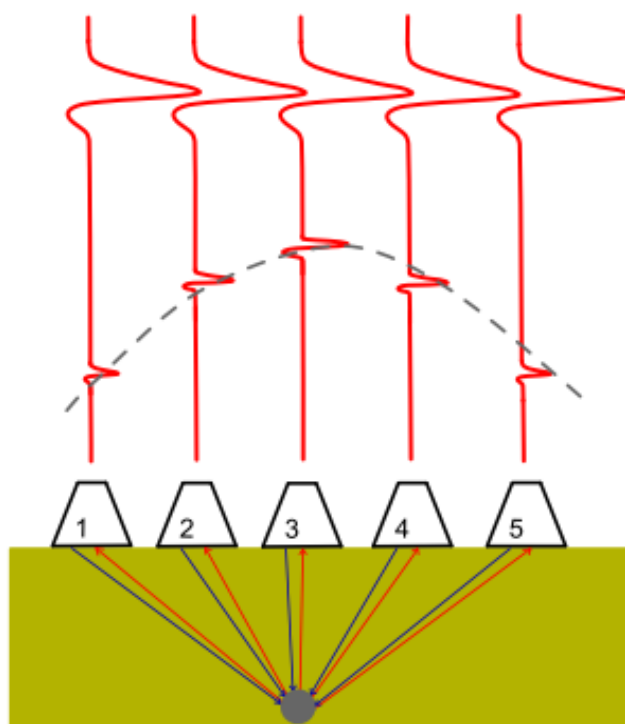
## 2.2 Princip funkce GPR

Základní princip funkce impulsního GPR je velice jednoduchý. GPR radar vysílá do zkoumaného materiálu elektromagnetické impulsy a následně měří dobu jejich příchodu zpět k radaru. Abychom zvýšili virtuální aperturu (účinnou plochu) antény, provedeme takové měření ve více místech nad zkoumaným materiálem. V každém měřeném místě tedy vyšleme impuls a změříme impulsní odezvu prostředí na vyslaný impuls. Takový postup sběru dat a jejich následné zobrazení se obecně označuje jako SAR (synthetic aperture radar).

Vysvětlení funkce GPR si ukažme na jednoduchém příkladu. Předpokládejme použití monostatického radaru a měření pouze v pěti pozicích. Nechť je hledaný objekt uvnitř homogenního materiálu a nechť má tento materiál jinou permitivitu, než má hledaný objekt. Předpokládejme ještě, že se tento objekt chová jako bodový odrazeč, abychom mohli zanedbat nepříznivé jevy při šíření elektromagnetického vlnění. Vlastní měření realizujeme postupným posouváním celého radaru nebo jeho antén z polohy 1 do polohy 5, viz Obr. 3. V každé poloze je z antény vyslán elektromagnetický impuls. Většina energie impulsu se odrazí od rozhraní vzduch-zkoumaný materiál. Důvodem tohoto silného odrazu je skokový

rozdíl v permitivitě. Menší část energie impulsu penetruje do zkoumaného materiálu. Pokud tedy předpokládáme homogenitu materiálu, pak se impuls může odrazit pouze na rozhraní hledaného objektu a jeho okolí. Energie impulsu odraženého od hledaného objektu je o několik řádů nižší, než energie impulsu odraženého od povrchu materiálu. Přijímač GPR systému tedy musí disponovat velkou vstupní dynamikou.

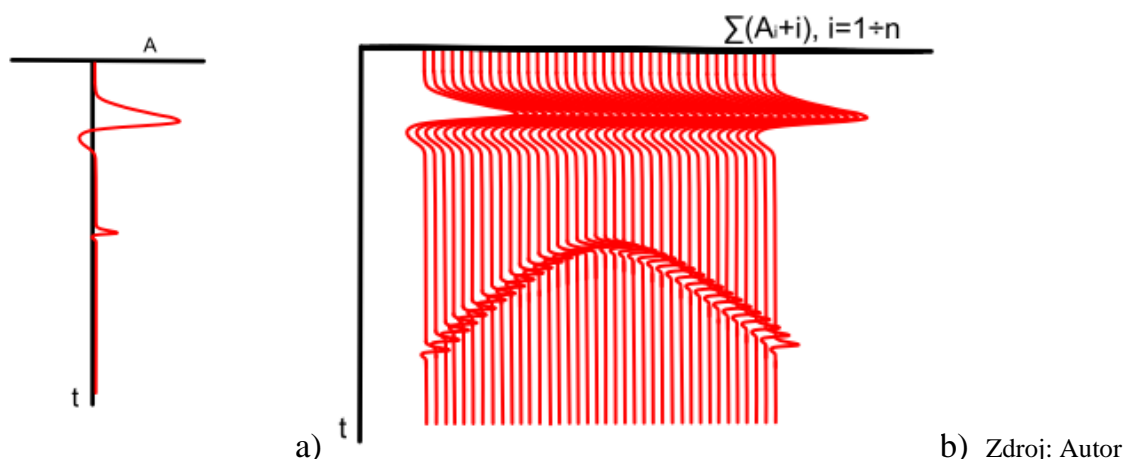
Uvažujme začátek měření v poloze 1, podle Obr. 3. Přestože anténa není při příjmu přímo nad hledaným objektem, tak díky postranním lalokům dokáže přijmout slabý impuls, který je objektem odražen. Dráha od antény v poloze 1 k objektu je relativně dlouhá, proto bude odražený impuls registrován za dlouhý časový interval. V poloze 2 je tato dráha kratší, impuls bude přijat dříve a vlivem nižšího útlumu v materiálu bude i jeho amplituda vyšší. V poloze antény na pozici 3 bude přijatý impuls zaznamenán nejdříve z uvažovaných poloh měření a jeho amplituda bude nejvyšší. V polohách 4 a 5 se bude amplituda přijatého impulsu snižovat a čas jeho zaznamenání prodlužovat. Pokud si znázorníme jednotlivé časové průběhy ze všech měření vedle sebe jako v horní části Obr. 3 a pomyslně si propojíme pozice odraženého impulsu ze všech poloh antény, pak dostaneme charakteristický tvar odrazu od bodového objektu – hyperbolu. Čím bude hlavní vyřazovací lalok použité antény užší, tím užší bude i zobrazená hyperbola.



Zdroj: Autor

Obr. 3 - Princip GPR

Časový průběh jednoho přijatého impulsu se označuje jako A-Scan. Namísto zobrazování jednotlivých A-Scanů z každé polohy se spíše využívá zobrazení typu B-Scan. Toto zobrazení je vhodné seřazení změřených A-Scanů tak, aby tvořili jednotlivý obraz. Na Obr. 4 a) vidíme A-Scan z jedné polohy přijímací antény. Vhodně sestavený B-Scan je na Obr. 4 b).



Obr. 4 - Sestavení B-Scanu. A-Scan (a),  
B-Scan sestavený z posunutých A-Scanů (b)

### 2.3 Použití GPR

Před vlastním měření s GPR radarem se nejprve provádí kontrolní vývrty. Při kontrolním vývrtnu vozovky se odebere například 30 cm vysoký válec o průměru 10 cm. Přes takto odebraný vzorek se změří rychlost šíření elektromagnetické vlny. Jelikož známe délku vzorku vývrtnu, tedy dráhu průchodu impulsu, jsme jednoznačně schopni určit i rychlost šíření impulsu daným materiálem. Z této rychlosti a podle vzorce (2) zjistíme i relativní permitivitu odebraného vzorku. Ve vzorci figuruje i neznámá relativní permeabilita, její hodnota však u většiny běžných materiálů rovna jedné. Zjištěnou velikost relativní permitivity můžeme využít při zpracování signálu.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (2)$$

kde  $v$  je rychlost šíření elektromagnetické vlny materiálem,  $\varepsilon_r$  představuje relativní permitivita materiálu,  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita materiálu a  $\mu_0$  je permeabilita vakua.

Při hlavním měření pak měříme impulsové odezvy pro jednotlivé polohy přijímací antény. Na základě časového zpoždění a známé rychlosti šíření elektromagnetické vlny v daném materiálu určíme vzdálenost radaru od cíle.

Jako příklad měření s monostatickým GPR radarem uvažujme, že cíl – například kovová kulička je umístěna v hloubce 30 cm v materiálu s relativní permitivitou  $\varepsilon_r = 5$ . Předpokládejme ještě, že anténa je přiložena těsně na povrchu měřeného materiálu. Ze vzorce (2) spočítáme (při zanedbání relativní permeability), že rychlost šíření vlny v daném materiálu je přibližně  $1,34 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Elektromagnetický impuls urazí 0,6 m dlouhou dráhu (od antény ke kuličce a zpět) při této konkrétní rychlosti za dobu  $t = 0,6 / 1,34 \cdot 10^8 = 4,48 \text{ ns}$ . Právě tuto hodnotu bychom měli zjistit GPR radarem. Pokud bude mít systém informaci o relativní permitivitě, pak lze přepočítat čas příchodu impulsu na vzdálenost.

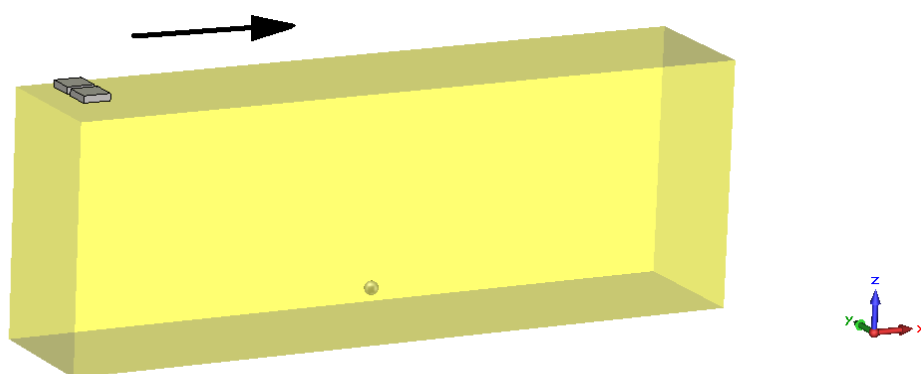
### 3. SIMULACE SYSTÉMU GPR

#### 3.1 Popis simulace

Simulace celého systému byla vytvořena a vypočtena v CST Microwave Studio (CST MWS) (5). Frekvenční pásmo simulace bylo nastaveno na 0 až 4 GHz a pro tvar vysílaného impulsu byl vybrán Gaussův impuls. Další informace o simulacích GPR lze nalézt například v (6).

Na Obr. 5 je znázorněna simulovaná scéna. Simulace je tvořena monostatickou anténou, zkoumaným materiálem tvaru kvádru a jednoduchým odražečem – kovovou kuličkou. Anténa je širokopásmový dipól. Okolí bodového odražeče je vyplněno materiálem s homogenním rozložením relativní permitivity s hodnotou  $\epsilon_r = 5$ . Tato hodnota přibližně odpovídá například relativní permitivitě suchého betonu.

Anténa se při simulaci nad testovaným kvádrem pohybuje ve směru osy  $x$  v konstantní výšce 1 cm nad jeho povrchem. Kvádr je umístěn symetricky na ose  $x$  v rozsahu  $[-50; 50]$  cm. Rozměr kvádru v osách  $x$ ;  $y$ ;  $z$  je 100; 20; 35 cm. Rozsah vodorovného pohybu antény nad kvádrem v ose  $x$  je zvolen od  $-44$  cm do 44 cm s krokem 2 cm, celkový počet kroků je 45. Kulička uvnitř kvádru je umístěna v hloubce 30 cm na průsečíku os  $x$  a  $y$ . Poloměr kuličky je 1,5 cm.

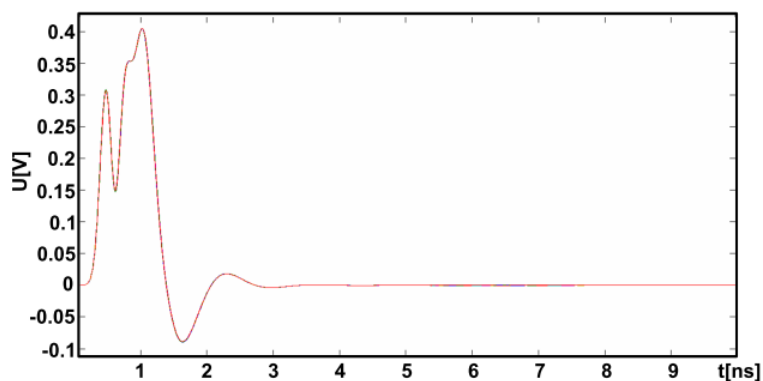


Zdroj: Autor

Obr. 5 - Simulační schéma

#### 3.2 Výstupní data simulace

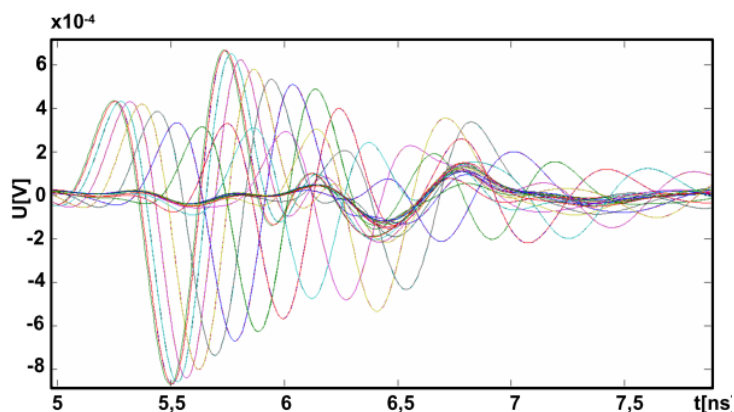
Výsledkem simulace je soubor se 45 přijatými průběhy, tedy A-Scany, viz Obr. 6. Na obrázku jsou zakresleny všechny průběhy přes sebe. Z obrázku je zřejmé, že přijaté signály z každé pozice jsou téměř identické. V čase zhruba do 3 ns vidíme silný impuls, jedná se o přímou cestu vyslaného impulsu do přijímače a o impuls odražený od povrchu simulovaného prostředí. V čase zhruba od 5 ns do 8 ns se nachází velice jemné zvlnění. Zde se již jedná o hledaný odraz od kuličky uvnitř kvádru.



Zdroj: Autor

Obr. 6 - Simulované A-Scany

Obr. 7 je výřezem oblasti přijatých dat (5 až 8 ns), který obsahuje odraz od kovové kuličky. Amplituda impulsu odraženého od kuličky je zhruba o 40 dB nižší, než amplituda impulsu odraženého od povrchu kvádrů. Odraz od kuličky je zřejmý v každém průběhu přijatého impulsu, protože nebyla použita směrová anténa.



Zdroj: Autor

Obr. 7 - Simulované A-Scany, výřez oblasti odraženého impulsu

## 4. MIGRACE

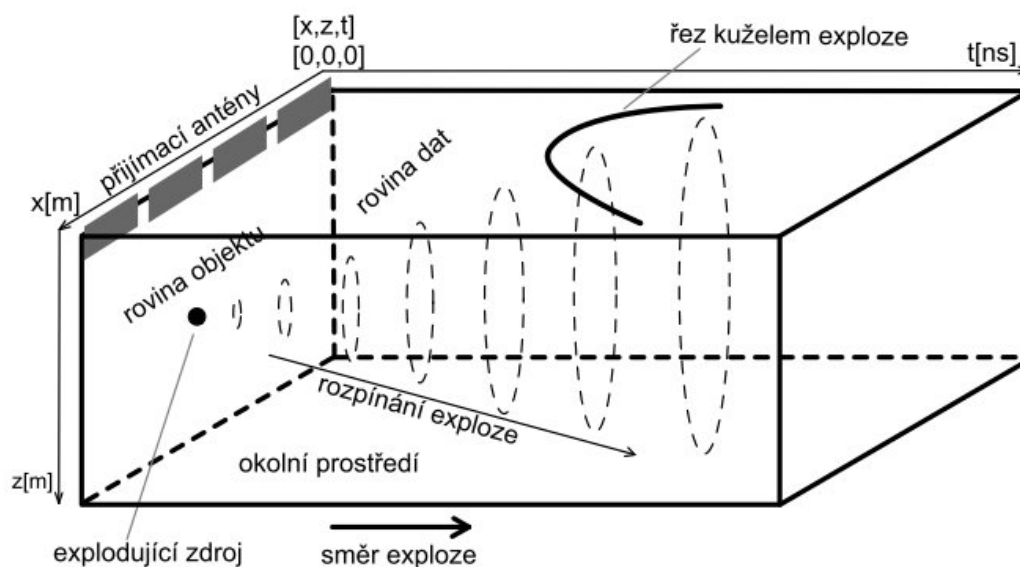
Pro zkvalitnění zobrazení dat z radarů GPR ve formě B-Scanu se používají různé matematické metody. Bodové cíle se při měření GPR radarem zobrazí v B-Scanu jako hyperboly. Pro potlačení tohoto jevu byla vyvinuta řada matematických metod. Tyto metody označujeme jako migrace (7), (8). Migrace mají původ v seismologii, kde se však používají na zpracování zvukových signálů. Ukazuje se však, že metody zpracování dat v seismologii lze s úpravami aplikovat i na data, která byla získána pomocí elektromagnetických vln. Kvalitní fokusace cílů dosahují migrační algoritmy, které jsou založeny na řešení vlnové rovnice, jako je například Kirchhoffova migrace (7), (8). Migrace je označována jako Kirchhoffova, protože při řešení vlnové rovnice se používá Kirchhoffova integrálu. Výchozím bodem pro pochopení algoritmu migrace je model explodujícího zdroje.

### 4.1 Model explodujícího zdroje

Model explodujícího zdroje se používá jako teoretický základ pro popis algoritmu Kirchhoffovy migrace. V modelu se uvažuje pouze šíření elektromagnetické vlny od cíle (explodujícího zdroje). Aby byla kompenzována délka jedné trasy elektromagnetické vlny, je

uvažována poloviční rychlost šíření vlny uvnitř testovaného prostředí. Model je zobrazen na Obr. 8. Uvažujme zdroj exploze jako bod uprostřed roviny  $xz$ , kterou budeme označovat jako rovinu objektu. Rovinu  $xt$  označujeme jako datovou rovinu. Pomocí GPR radaru získáme data, která jsou v datové rovině. Hlavní cíl migrace je pak transformace z roviny datové  $xt$  do roviny objektu  $xz$ . Antény jsou umístěny v rovině  $xz$  na přímce  $z = 0$ .

Předpokládejme, že v čase  $t = 0$  dojde k explozi bodu. Vzniklá vlna se šíří podél časové osy a lineárně se rozpíná. V určitém místě vlna přejde přes rovinu  $xt$ . Průnik vln exploze a této roviny nám na rovině  $xz$  vytne hyperbolu. První bod průniku, který se časově objeví jako první, je ohnisko hyperboly. Úkolem migrace je transformace obrazu hyperboly zpět na výchozí tvar cíle (zdroje).



Zdroj: (7)

Obr. 8 - Model explodujícího zdroje

## 4.2 Princip Kirchhoffovy migrace

Odvození Kirchhoffovy migrace vychází z integrálního řešení skalární vlnové rovnice. Integrujeme B-Scan, který je získán v rovině  $xt$ . Výsledkem integrálu je pak B-Scan, který je transformován do roviny  $xz$ .

Pro uvažovanou Kirchhoffovu migraci je nutné splnit několik omezujících podmínek. První podmínkou je homogenita okolí cíle. Druhou podmínkou je nutná znalost permitivity okolního materiálu. Poslední podmínkou je získání dat pomocí monostatického GPR radaru. Základní rovnice dvourozměrné Kirchhoffovy migrace je:

$$K_m(x', z') = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial b(x, 2 \cdot r/v)}{\partial t} \frac{\cos(\theta)}{r \cdot v} dS \quad (3)$$

kde  $b(x, 2 \cdot r/v) = b(x, t)$  je vstupní dvourozměrný B-Scan s naměřenými daty v rovině  $xt$ ,  $r$  je vzdálenost přijímací antény a vyšetřovaného bodu,  $v$  je rychlost šíření vlnění v daném materiálu,  $x$  je poloha antény v ose  $x$ ,  $x'$  a  $z'$  jsou souřadnice aktuálně vyšetřovaného bodu,  $\cos(\theta)$  kompenzuje směrovost antén.

Pro digitální zpracování je třeba rovnici (3) diskretizovat, rovnice pak přejde na tvar:



$$K_m(x', z') = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\partial b(x_i, 2 \cdot r/v)}{\partial t} \frac{\cos(\theta)}{r \cdot v} \quad (4)$$

## 5. ZPRACOVÁNÍ SIMULOVANÝCH DAT

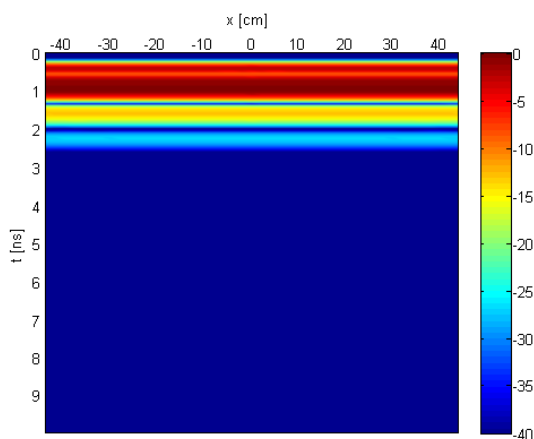
### 5.1 Načtení a zobrazení dat

Odraz od kovové kuličky je velice slabý v porovnání s prvním odrazem od povrchu materiálu. Metod zvýraznění slabého odrazu vzhledem prvnímu silnému odrazu existuje mnoho, ale my zde použijeme ten nejjednodušší. Zkoumanou strukturu si nasimulujeme znovu, ale bez hledané kovové kuličky. Nově získané impulsové odezvy následně odečteme od první simulace a tím se zbavíme prvního silného odrazu a také všeho nesouvisejícího s kuličkou. Tento postup není v praxi použitelný, byl však zvolen pro svoji názornost.

Data ze simulace v prostředí CST MWS nejsou bez úprav vhodná pro digitální zpracování. Jednotlivé vzorky simulovaného signálu mohou být v CST MWS odebírány s různým časovým krokem. Navíc i počet vzorků každého časového průběhu může být odlišný. Byl tedy vytvořen načítací skript, který dokáže data všech průběhů převzorkovat stejnou konstantní vzorkovací frekvencí. Ze zadaného vzorkovacího kmitočtu je sestaven vektor časových hodnot, ke kterým bude třeba nalézt příslušné hodnoty amplitud impulsu. Veškerá výsledná data jsou potom sestavena do velké zobrazovací matice, která je potom vhodnou funkcí zobrazena.

Prvním výsledkem skriptu v programu MATLAB je zobrazení matice, ve které jsou vhodně seřazeny převzorkované průběhy. Vertikální rozměr této matice odpovídá počtu vzorků odebraných z každého průběhu. Horizontální rozměr odpovídá počtu změřených průběhů. Oba rozměry však nemají vypovídací schopnost o původní simulaci, proto je naprosto nezbytné oba rozměry přepočíst. Vertikální osa musí mít rozměr času, horizontální pak rozměr vzdálenosti. Nakonec jsou všechny hodnoty matice přepočítány na decibely a normovány k maximu. Takto upravená matice se označuje jako B-Scan.

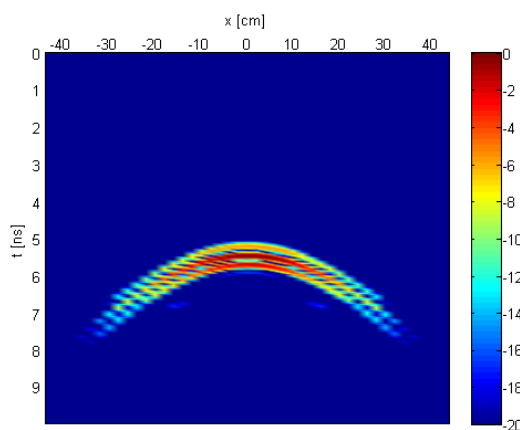
Na Obr. 9 je znázorněn základní B-Scan první simulace. Relativní permitivita materiálu, ve kterém je uložena kovová kulička, je zvolena na  $\epsilon_r = 5$ . Uvažovaná dynamika systému je 40 dB, B-Scan tedy zobrazuje hodnoty od 0 dB do -40 dB. Kulička by se měla objevit zhruba na souřadnicích [0; 4,5]. Bohužel dynamika uvažovaného systému je příliš nízká a proto se kulička nijak neprojeví. V horní části obrázku je vidět silný odraz impulsu odraženého přímo od rozhraní vzduch-zkoumaný materiál. Aby byl obraz kuličky viditelný, bylo by nutné buď zvýšit dynamiku zobrazení, nebo odečíst odraz od rozhraní vzduch- zkoumaný materiál.



Zdroj: Autor

Obr. 9 - B-Scan s dynamikou 40 dB

Na Obr. 10 je už odraz od kovové kuličky viditelný. V tomto případě byl odečten nejprve silný odraz signálu od povrchu zkoumaného materiálu. Tím byl získán kvalitnější obraz a dynamika zobrazení mohla být navíc snížena na 20 dB.



Zdroj: Autor

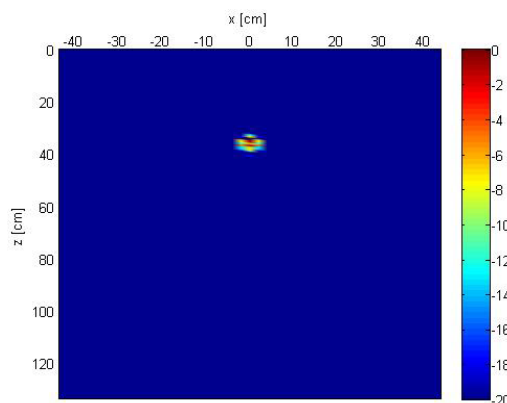
Obr. 10 - B-Scan s dynamikou 20 dB a odečteným prvním odrazem

## 5.2 Použití Kirchhoffovy migrace

Vstupní data jsou ve formě dvourozměrné matice, tedy B-Scanu. Horizontální rozměr matice odpovídá počtu pozic, ve kterých byla data získána. Vertikální rozměr odpovídá počtu vzorků každého změřeného signálu. Ze známé rychlosti šíření elektromagnetické vlny v daném materiálu je tato matice přepočtena z roviny  $xt$  do roviny  $xz$ . Dále je provedena časová derivace všech naměřených signálů z každé pozice přijímací antény. Je určen úhel  $\theta$  který svírá kolmice na zkoumaný materiál v místě přijímací antény s každým počítaným bodem B-Scanu. Dále je spočtena vzdálenost  $r$  mezi anténou a každým bodem B-Scanu. V tuto chvíli již máme vypočtené vše potřebné, tedy matici se vzdálenosti  $r$  a matici s úhly  $\theta$ , jejichž cosinus vystupuje ve vzorci (4) a můžeme přikročit k finální sumaci.

Vstupní data ve formě dvourozměrného B-Scanu jsou na Obr. 10. Jedná se o odraz od bodového cíle. Výsledný B-Scan, který prošel algoritmem Kirchhoffovy migrace je na Obr. 11. Charakteristický hyperbolický obraz cíle byl algoritmem migrace potlačen. Zůstalo pouze ohnisko hyperboly, které se navíc posunulo nahoru do správné pozice. Tento posun je způsoben přepočtením času šíření elektromagnetického impulsu na vzdálenost, v tomto

případě hloubku. Na vertikální ose lze po migraci odečítat skutečnou hloubku uložení testovaného bodového cíle. Hloubku můžeme tedy odhadnout na 30 cm, což je v dobré shodě s nastavením simulace, popsané ve druhé kapitole.



Zdroj: Autor

Obr. 11 - B-Scan přepočítaný Kirchhoffovou migrací

## ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo představení UWB technologie v oblasti diagnostiky pevných materiálů pomocí radarů GPR. Byly představeny vlastnosti radarů GPR a poté byl vysvětlen princip jejich funkce. Další částí příspěvku byla popsána simulace systému GPR v programu CST MWS. Tato simulace byla sestavena tak, aby jejím výstupem byla data, která by se přiblížila reálnému měření s GPR radarem. Následovala kapitola s představením metody, zpřesňující zobrazení simulovaných dat. Poslední kapitola se věnovala vlastnímu zpracování simulovaných dat. Byl sestaven B-Scan, na kterém byl vidět hyperbolický obraz cíle. Tento B-Scan byl nakonec zpracován metodou Kirchhoffovy migrace. Díky této metodě bylo možné určit pozici cíle přesněji a dokonce odhadnout jeho tvar. Motivací k další práci by mohlo být rozšíření příspěvku o složitější migrační algoritmy, pracující ve frekvenční oblasti.

## POUŽITÁ LITERATURA

- (1) SIWIAK, K., MCKEOWEN, D.: *Ultra-wideband radio technology*, John Wiley & sons , 2004, 264 stran, ISBN 0-470-85931-1.
- (2) PROTIVA, P., MRKVICA, J.: *Nedestruktivní měření vnitřní struktury stavebních materiálů pomocí UWB technologie*. In *Sborník recenzovaných příspěvků konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009, s. 467-474. ISBN 978-80-214-3951-1.
- (3) DANILES, D.; *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, IEE, 2004, 724 stran, ISBN 0-86341-360-9.
- (4) MALA Geoscience, [online]. c2013, aktualizováno 1.1.2013. Dostupné z: <<http://www.malags.com/Support/FAQ>>.
- (5) Computer Simulation Technology corp., [online]. c2013, aktualizováno 1.1.2013. Dostupné z:<<http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>>.
- (6) PROTIVA, P.: *Šíření UWB signálu v nehomogenním prostředí*, Disertační práce, FEL ČVUT Praha, 2011, 110 stran.

- (7) GILMORE, C. G.; *A Comparison of Imaging Methods using GPR for Landmine detection and A Preliminary Investigation into the SEM for Identification of Buried objects*. Master's thesis, University of Manitoba, 2004.
- (8) SCHNEIDER, W. A.; *Integral formulation for migration in two and three dimensions*. *Geophysics*. 1978, 43, 1, s. 49-76. ISSN 0016-8033. doi: 10.1190/1.1440828.