

VLIV TVARU BUDÍCÍHO PULZU NA ŠÍŘENÍ NAPĚŤOVÝCH VLN V TLUSTÉ DESCE

Petr HORA*

Abstrakt: V příspěvku je vyšetřován vliv tvaru budícího pulzu na šíření napěťových vln v tlusté desce. Šíření napěťových vln v tlusté desce je podstatně ovlivněno geometrickou disperzí, která se projevuje rozšiřováním vlnového balíku v prostoru i času. Je ukázáno, že trvání vlnového balíku se zvětšuje lineárně se vzdáleností, po kterou se vlna šíří, a dále že trvání vlnového balíku závisí na vstupním signálu, tj. budícím pulzu. Pro případ ocelové desky jsou parametry vstupního signálu (obálka, modulační frekvence a počet pulzů) optimalizovány tak, aby se vliv disperzního chování projevoval minimálně a dosáhlo se tak maximální rozlišitelnosti na velké vzdálenosti, což je velice důležité pro NDT metody využívající vlny vedené vlnovodem, tzv. "guided waves".

Klíčová slova: disperze, šíření vln

1. ÚVOD

Tento příspěvek se zabývá vlivem geometrické disperze na šíření napěťových vln zejména vzhledem k možnosti využití *vedených vln* (vedených vlnovodem) pro kontrolu konstrukcí na velké vzdálenosti. Příspěvek vychází z článku [1].

Široký rozsah prací publikovaných na téma použití *vedených vln* pro účely kontroly konstrukcí lze nalézt v [2]. Použití *vedených vln* pro účely nedestruktivního vyšetřování spadá s ohledem ke vzdálenosti šíření do dvou kategorií. První kategorie, šíření na krátké vzdálenosti, obsahuje aplikace, u nichž jsou *vedené vlny* používány k získání informací o testovaném vzorku. Tyto oblasti zahrnují např. určení elastických vlastností materiálu, detekce defektů v okolí rozhraní atd. V těchto aplikacích je rozhodujícím kritériem citlivost. Vzhledem k malým vzdálenostem je vliv disperze vcelku nedůležitý.

Zde se soustředíme na druhou kategorii aplikací *vedených vln*, při které je naopak vzdálenost, po níž se vlny šíří, velká. Tyto aplikace zahrnují kontrolu kompozitů, potrubí a desek. V této kategorii je hlavním cílem především rychle zkontrolovat velké oblasti vzorků.

Vedené vlny jsou vybudeny krátkým energeticky silným impulzem aplikovaným vhodným budičem do jednoho místa na vzorku. Vybudení vyvolá balík *vedených vln*, který se šíří od snímače do okolního prostředí. K detekci signálů vyvolaných odrazy od okolních rozhraní nebo defektů je použit buď stejný nebo druhý snímač.

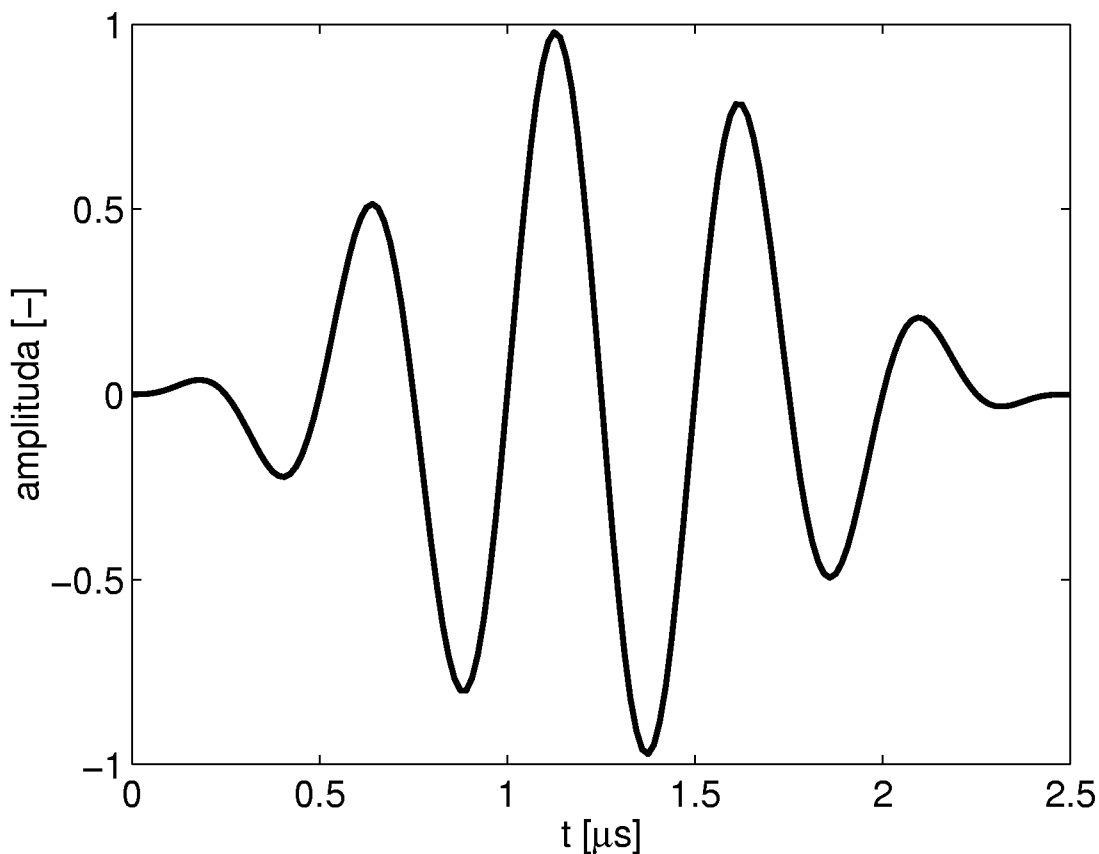
* Ing. Petr Hora, CSc., Centrum diagnostiky materiálu, Ústav termomechaniky Akademie věd ČR, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň, e-mail: hora@cdm.it.cas.cz

Problémy spojené s využitím *vedených vln* pro účely kontroly spočívají jak v existenci více módů *vedených vln*, tak v disperzním chování (tj. jejich fázové rychlosti jsou závislé na kmitočtu) těchto módů. Abychom ze systému používajícím *vedené vlny* dostali užitečná data, je nezbytné selektivně vybudit a detekovat pouze jeden mód.

Příklady snímačů, které lze použít k vybudení a detekci *vedených vln* jsou uvedeny v [3] a [4]. Vstupními signály jsou radioimpulzy s vhodnou okénkovou funkcí, přesnou střední frekvencí a omezenou šířkou pásma. Důvodem pro omezení šířky pásma je jednak odstranění nežádoucího vybudení okolních módů a dále redukce vlivu disperze na šíření požadovaného módu, což je téma tohoto příspěvku.

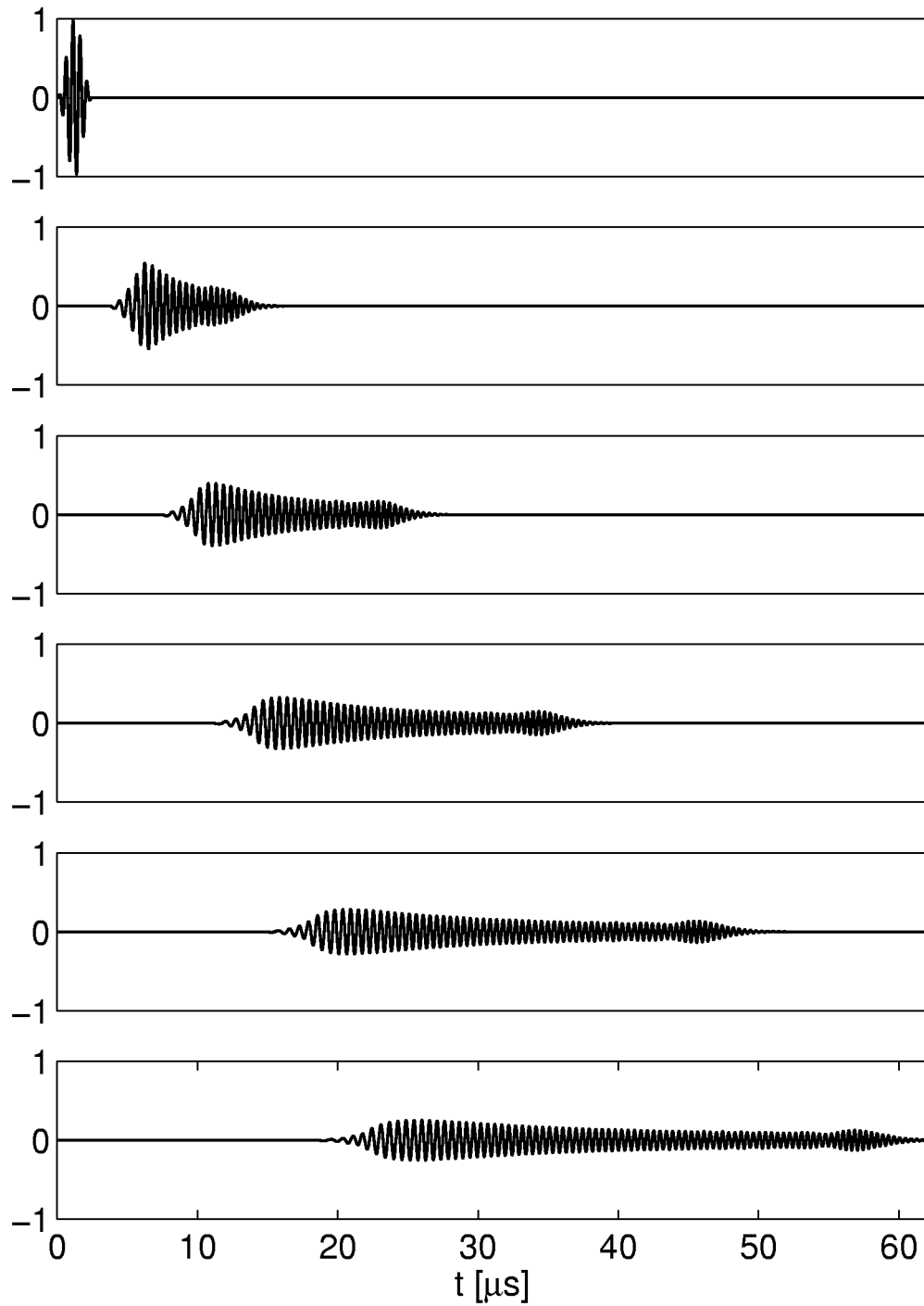
2. GEOMETRICKÁ DISPERZE

Disperzi lze definovat jako jev, při kterém se vlnové složky ve vlnovém balíku šíří různými fázovými rychlostmi v závislosti na frekvenci. To se projevuje jako prodlužování vlnového balíku v prostoru a čase při jeho šíření strukturou. Na obr. 1 je znázorněn budící vstupní signál ve tvaru radioimpulzu o 5-ti cyklech s Hannovým okénkem a střední frekvencí 2 MHz, tj. šířka pulzu je 2.5 μs .



Obr. 1 Budící vstupní signál ve tvaru radioimpulzu o 5-ti cyklech s Hannovým okénkem a střední frekvencí 2 MHz.

Na obr. 2 je znázorněn jev geometrické disperze na příkladu šíření Lambova módu S_0 v 1 mm silné ocelové desce při vstupním signálu dle obr. 1. Tuto konfiguraci budeme dále v textu nazývat vzorovým příkladem.



Obr.2 Numerická simulace jevu geometrické disperze vzorového příkladu pro vzdálenosti 0, 20, 40, 60, 80 a 100 mm (shora dolů).

Jevy zvětšování časového trvání vlnového balíku a zmenšování amplitudy vyvolané disperzí jsou pro testování rozsáhlých struktur, které využívá *vedených vln*, nežádoucí.

Rozšiřování vlnového balíku v prostoru a čase redukuje dosažitelné rozlišení. Tento problém se často vyskytuje při pokusu detekovat defekt v těsné blízkosti změny

struktury, např. v blízkosti svaru. V takovém případě může být defekt detekován, pouze pokud lze jeho odraz spolehlivě odlišit od odrazu vyvolaného změnou struktury.

Redukce amplitudy disperzního vlnového balíku redukuje citlivost testovacího systému. Zmenšování amplitudy vlnového balíku může být odhadnuto použitím zákona o zachování energie. Na jeho základě a při zanedbání jiných ztrát lze v prvním přiblížení předpokládat, že amplituda vlnového balíku se bude zmenšovat úměrně s druhou odmocninou jeho časového trvání.

3. MODELOVÁNÍ GEOMETRICKÉ DISPERZE

Abychom mohli dělat kvantitativní měření šíření napětíových vln, musíme být schopni modelovat, jak se vlnový balík za přítomnosti disperze šíří. Obvyklý způsob spočívá ve využití samotné definice disperzního jevu, tj. jevu, při kterém se energie ve vlnovém balíku šíří různými rychlostmi v závislosti na frekvenci. Uvažujme případ, kdy vhodný měnič vybudí ve struktuře *vedené vlny*. Předpokládejme, že je měnič ideální, tj. vybudí pouze jeden mód a to pouze v jedné směru. Měnič je napájen elektrickým signálem délky $V(t)$, který se mění na akustickou energii. Tato energie se šíří od měniče ve směru osy x jako jednoduchý mód *vedených vln*. Předpokládá se, že v místě měniče, $x=0$, je změna parametru v desce, např. vertikální výchylka u vzhledem k času t , přímo úměrná $V(t)$.

Funkci $u(t)$ lze považovat za řez v časo-prostorové rovině funkce $u(x,t)$, který prochází bodem $x=0$. Pokud známe disperzní křivky (závislost fázové rychlosti na frekvenci) pro daný systém, pak může být vypočteno $u(x,t)$ v libovolném bodě časo-prostorové roviny dle následujícího algoritmu.

Nejprve provedeme převod do frekvenční oblasti

$$U(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt$$

kde ω je úhlová frekvence. Hodnota $u(x,t)$ odpovídající individuální spektrální složce $U(\omega)$ je dána řešením vlnové rovnice ve frekvenční oblasti

$$U(\omega) e^{i(k(\omega)x - \omega t)},$$

kde $k(\omega)$ je vlnové číslo, které lze získat z fázové rychlosti $c_f(\omega)$ vztahem

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c_f(\omega)}.$$

Hodnota $u(x,t)$ je dána integrací příspěvků všech frekvenčních složek $U(\omega)$

$$u(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) e^{i(k(\omega)x - \omega t)} d\omega.$$

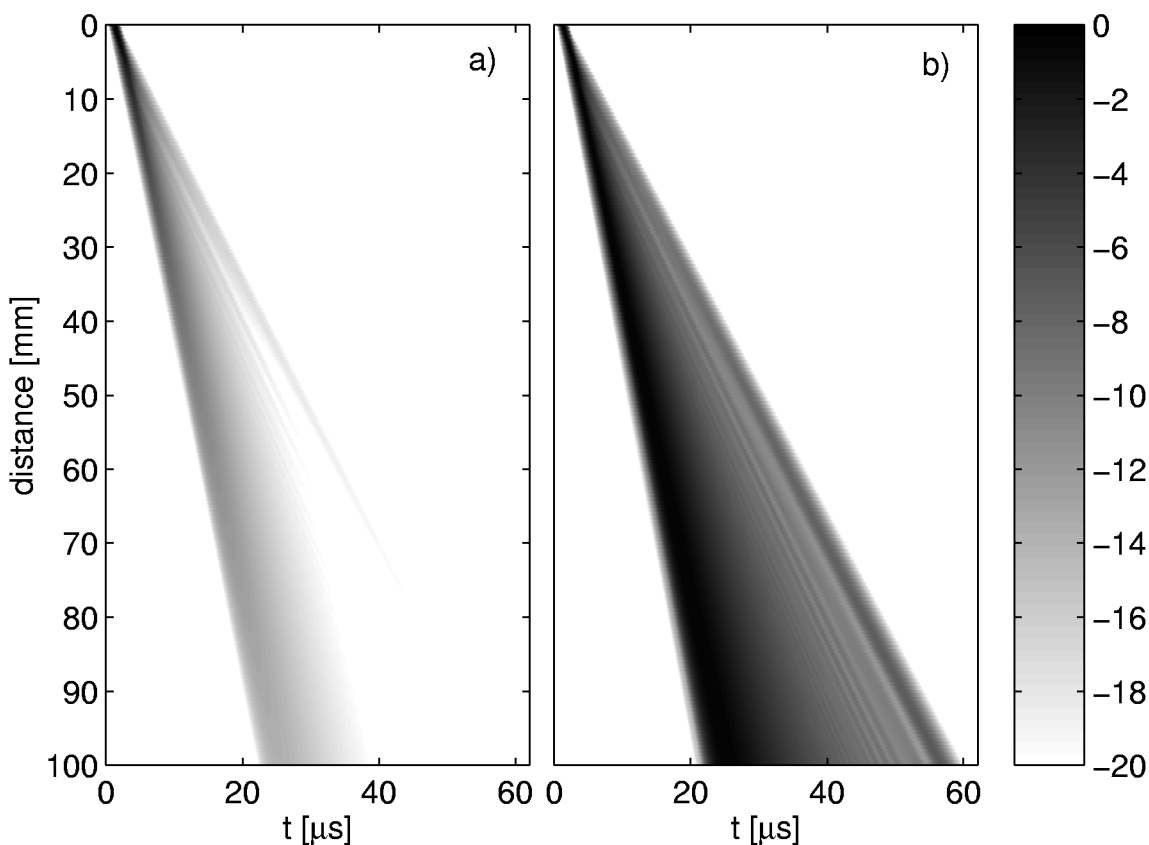
K vyhodnocení tohoto integrálu lze s výhodou použít FFT. Pro účel predikce hranic vlnového balíku je vhodnější pracovat s obálkou vlnového balíku, kterou získáme pomocí Hilbertovy transformace.

4. DEFINOVÁNÍ TRVÁNÍ VLNOVÉHO BALÍKU

Abychom dovedli kvantifikovat disperzi, je nezbytné umět změřit trvání vlnového balíku, což znamená vědět, kde vlnový balík začíná a kde končí.

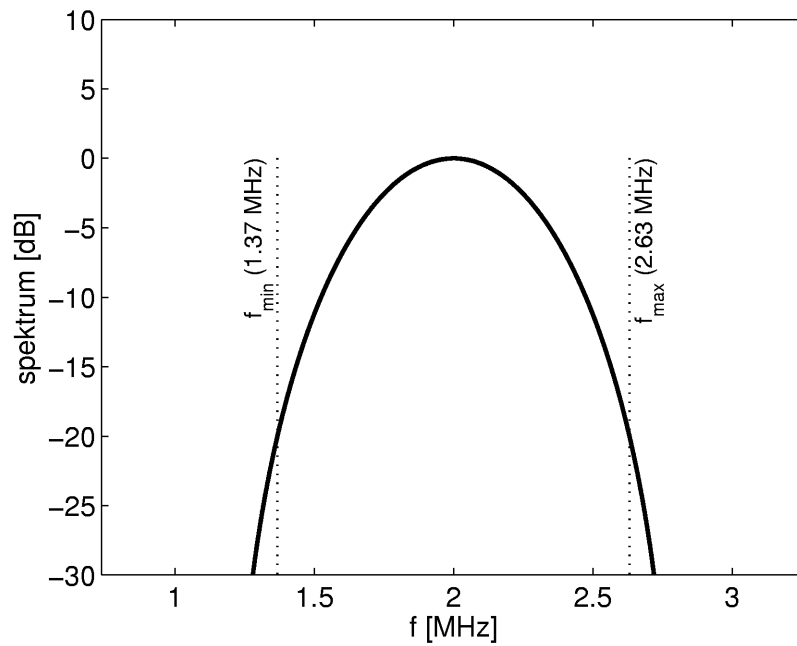
Jednou z možností je definovat začátek a konec vlnového balíku pomocí časoprostorové mapy $u(x, t)$, ve které si definujeme začátek a konec body, ve kterých obálka klesne pod danou referenční úroveň. Na obr. 3 jsou znázorněny dva případy volby referenční úrovně pro náš vzorový příklad: a) za referenční úroveň se volí globální maximum obálky (špičková hodnota obálky zdrojového signálu), b) pro každou vzdálenost se volí nová reference. Druhá možnost je pro účely sledování disperzního chování vhodnější.

Procedura Fourierovy dekompozice je pro získání trvání vlnového balíku velice neefektivní i přes použití FFT, proto uvedeme jinou možnost, která se opírá o znalost frekvenční závislosti grupových rychlostí. Mějme náš vzorový příklad. Šířku pásma vstupního signálu získáme nalezením frekvencí, ve kterých amplituda spektra padá o 20 dB, viz obr. 4.

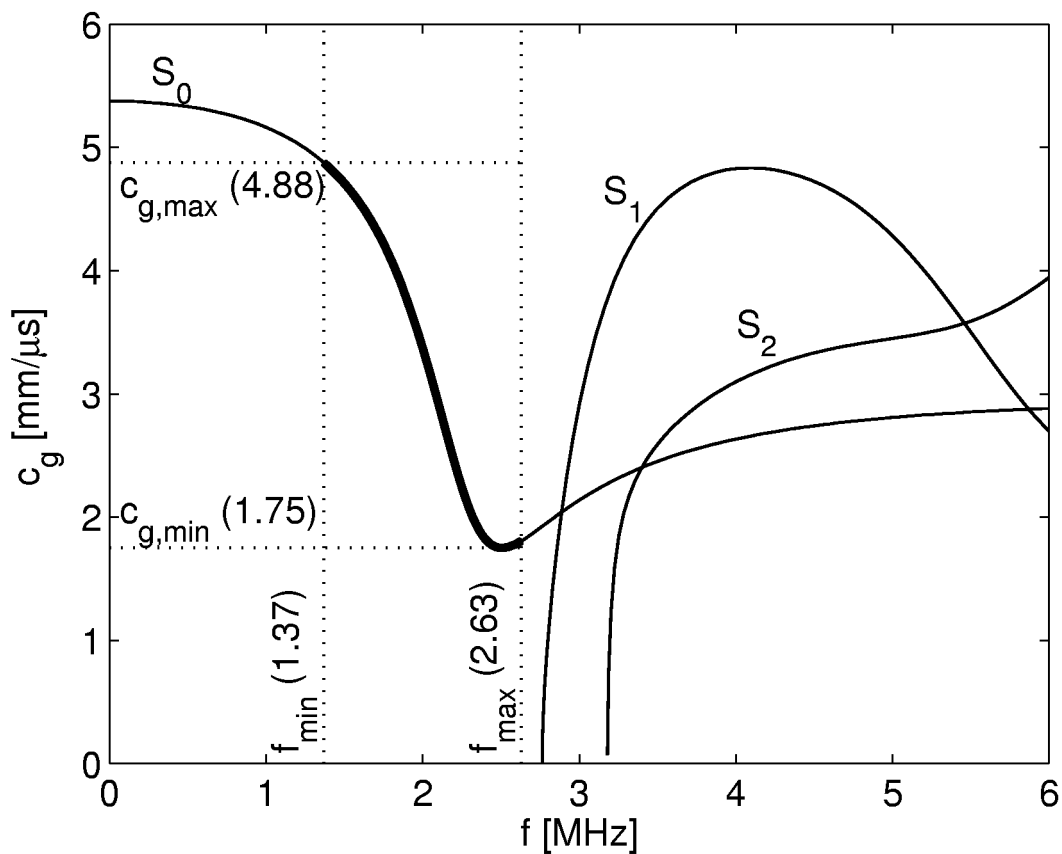


Obr. 3 Dvě různé definice referenční úrovně: a) reference (0 dB) je špičková hodnota obálky pro distanci rovnou nule, b) reference je přepočítána pro každou vzdálenost jako špičková hodnota obálky pro danou vzdálenost.

Frekvenční závislosti grupových rychlostí pro náš vzorový příklad jsou znázorněny na obr. 5. Vertikální čáry v tomto obrázku vyznačují šířku pásma dle obr. 4 a vodorovné čáry vyznačují minimální a maximální grupovou rychlost nacházející se v daném frekvenčním pásmu, tj. $c_{g,\min} = 1,75 \text{ mm}/\mu\text{s}$ a $c_{g,\max} = 4,88 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

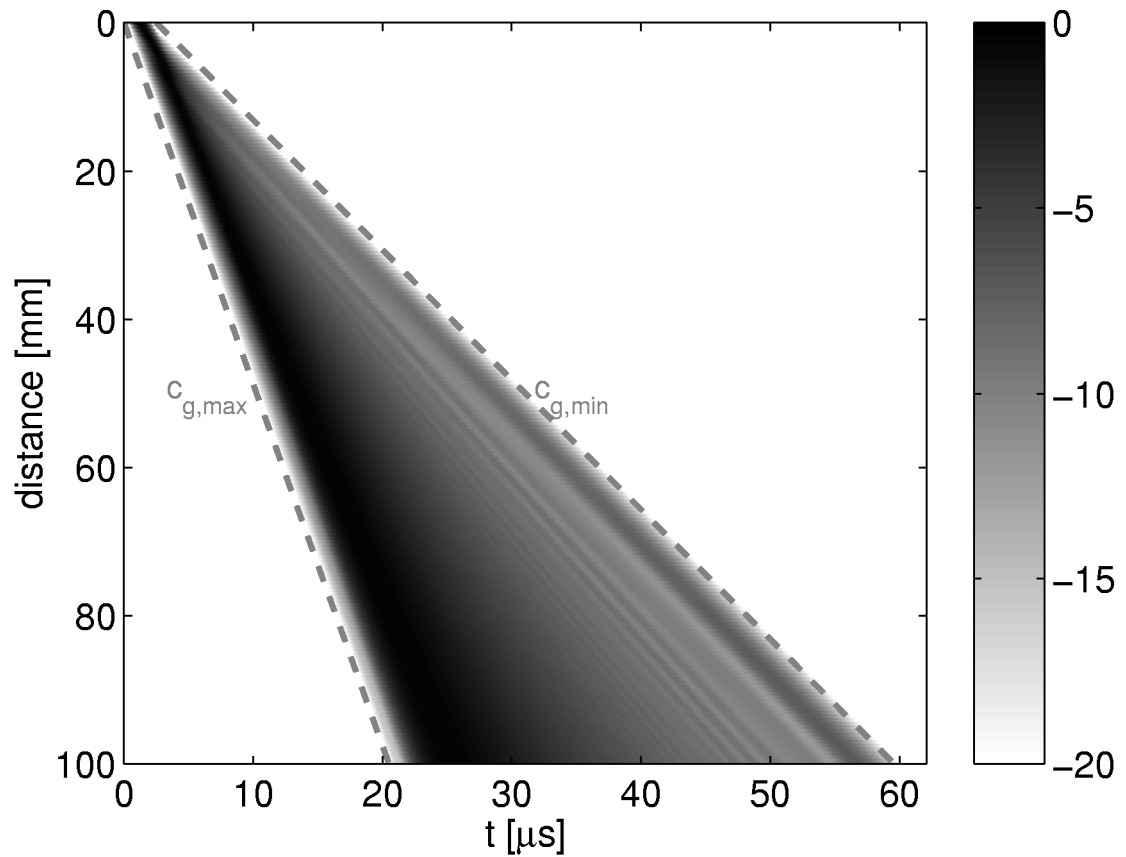


Obr. 4 Spektrum vstupního signálu s vyznačením -20 dB frekvenčního rozsahu.



Obr. 5 Frekvenční závislosti grupových rychlostí pro 1 mm silnou ocelovou desku ve vakuu. Vertikální čáry vyznačují šířku pásma dle obr. 4. Vodorovné čáry vyznačují minimální a maximální grupovou rychlost nacházející se v daném frekvenčním pásmu.

Na obr. 6 je porovnání metody Fourierovy dekompozice a metody grupové rychlosti (čárkovaná čára) pro náš vzorový příklad.



Obr. 6 Porovnání dvou metod predikce trvání vlnového balíku: metoda Fourierovy dekompozice a metoda grupové rychlosti.

5. KVANTIFIKOVÁNÍ DISPERZNÍHO ŠÍŘENÍ

Pokud označíme počáteční časové trvání vlnového balíku T_{in} , potom po šíření na vzdálenost l dostaneme nové časové trvání vlnového balíku T_{out} :

$$T_{out} = T_{disp} + T_{in},$$

kde T_{disp} je prodloužení trvání vlnového balíku vlivem disperze. Použitím techniky predikce disperze založené na grupové rychlosti můžeme psát:

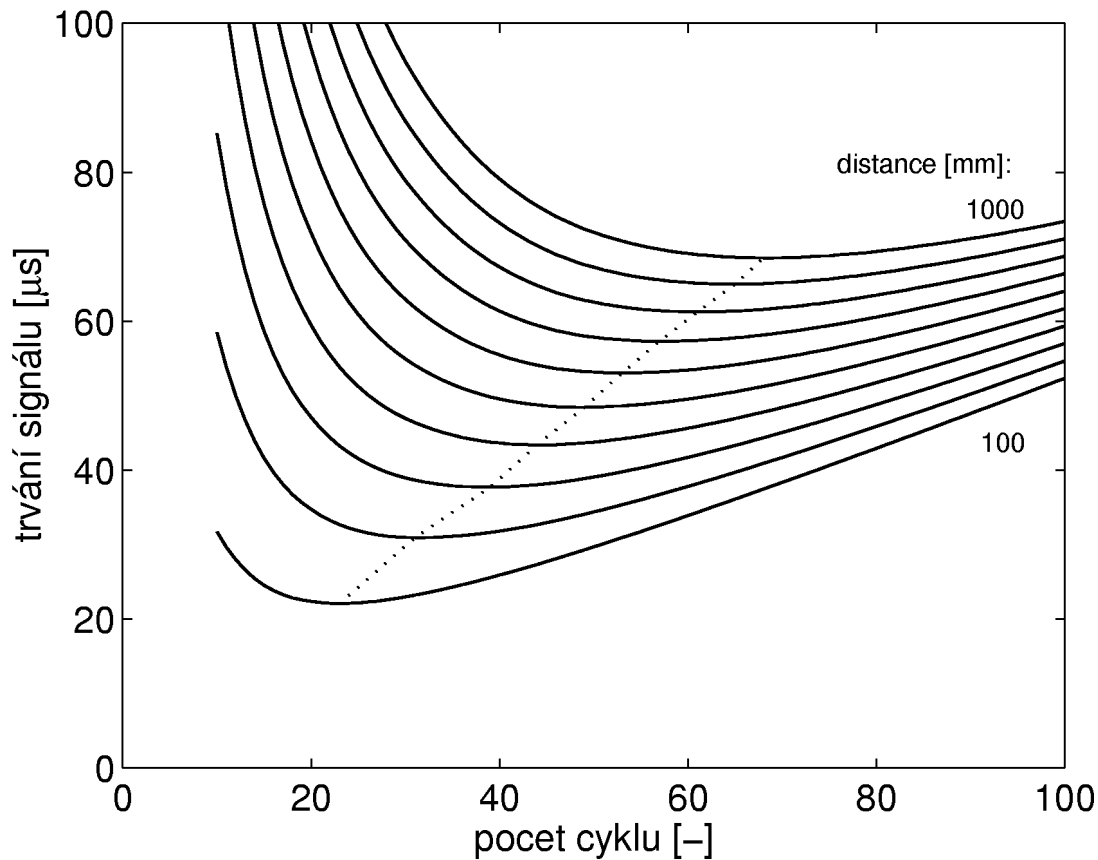
$$T_{disp} = l(1/c_{min} - 1/c_{max}).$$

Abychom získali míru prostorového rozlišení daného vlnového balíku, násobíme T_{out} nominální grupovou rychlostí c_0 (grupová rychlost střední frekvence). Z důvodu

bezrozměrnosti prostorového rozlišení dělíme T_{out} tloušťkou desky d . Tím dostaneme rozlišovací vzdálenost

$$\frac{T_{out}c_0}{d} = \frac{c_0}{d} (l(1/c_{min} - 1/c_{max}) + T_{in}).$$

Z této rovnice je patrné, že trvání vlnového balíku a tedy i rozlišovací vzdálenost je řízena dvěma členy, první člen vyjadřuje vliv disperze a druhý délku vstupního signálu. Obr. 7 znázorňuje graf závislosti trvání vlnového balíku na počtu cyklů vstupního signálu pro různé vzdálenosti.

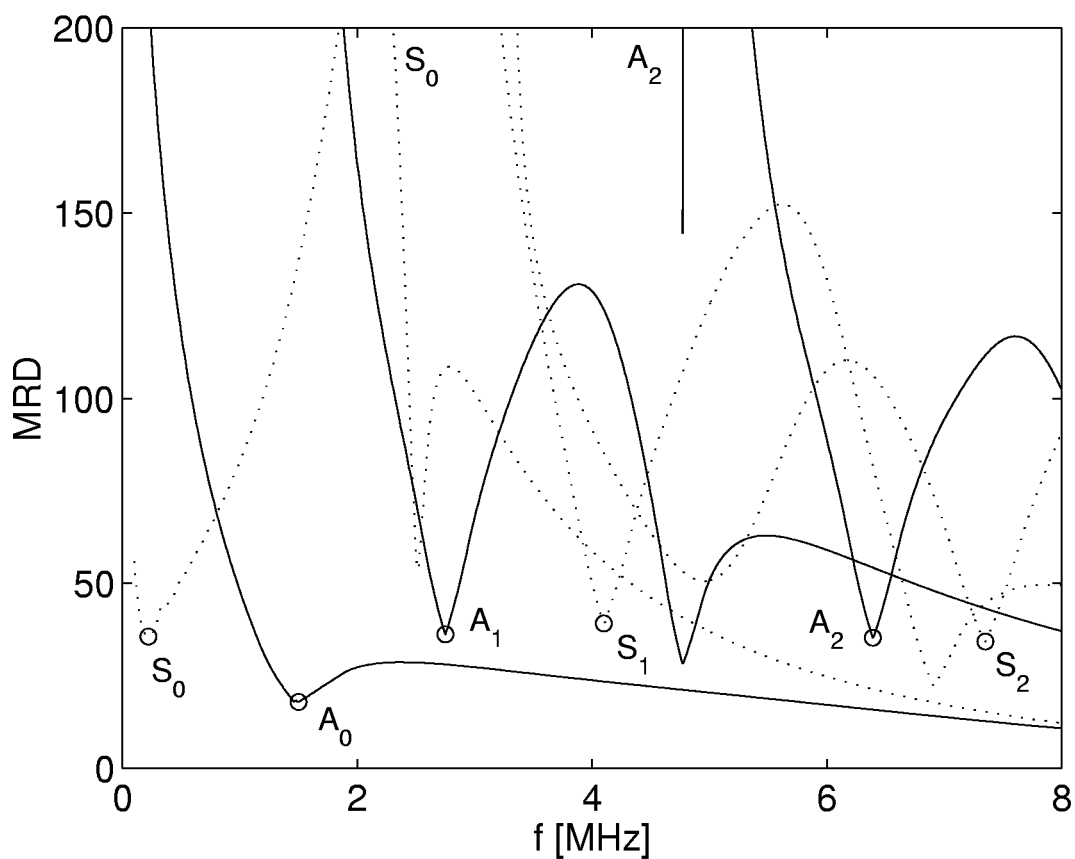


Obr. 7 Graf závislosti trvání přijímaného signálu na počtu cyklů pro různé vzdálenosti.

Dále zavedeme tzv. minimální rozlišovací vzdálenost (MRD – minimum resolvable distance):

$$MRD = \frac{c_0}{d} (l(1/c_{min} - 1/c_{max}) + T_{in})_{min}.$$

Na obr. 8 jsou uvedeny MRD-křivky pro Lambovy vlny v desce vzorového příkladu pro vzdálenost 1000 mm. Procedura používaná pro výpočet hodnoty MRD v každém bodě těchto křivek je iterační procedura, kde počet cyklů ve vstupním signálu je optimalizován tak, aby se minimalizovalo trvání vlnového balíku.



Obr. 8 Křivky MRD vzorového příkladu pro vzdálenost 1000 mm.

V následující tabulce (tab. 1) jsou shrnuty výsledky pro prvních šest Lambových módů.

Mód	A_0	S_0	A_1	S_1	A_2	S_2
Frekvence (MHz)	1.50	0.22	2.75	4.10	6.39	7.35
Optim. # cyklů	5	1	17	22	43	36
MRD	18	36	36	39	35	34

Tab. 1 Střední frekvence, optimální počet cyklů a MRD pro vzdálenost 1000 mm.

6. ZÁVĚR

V příspěvku byla prezentována jednoduchá metoda pro modelování šíření vln za přítomnosti geometrické disperze. Vliv geometrické disperze spočívá v různé rychlosti šíření energie vlnového balíku v závislosti na frekvenci, což se při průchodu vzorkem (strukturou) projevuje prodlužováním vlnového balíku v prostoru a čase.

Ukázalo se, že trvání vlnového balíku se zvětšuje lineárně se vzdáleností a také, že trvání vlnového balíku závisí na tvaru vstupního signálu. Veškeré výpočty byly prováděny pro příklad tenké (1 mm) ocelové desky.

Tato práce byla podporována Grantovou agenturou České republiky prostřednictvím grantu č.: 101/00/0674 – „Vliv materiálových nelinearit a geometrických nespojitostí na šíření napěťových vln“.

LITERATURA

- [1.] Wilcox P., Lowe, M., Cawley, P.: The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves. *NDT&E International*, 34, 2001, 1-9
- [2.] Chimenti D. E.: Guided waves in plates and their use in materials characterization. *Appl. Mech. Rev.*, 50, 1997, 247-284
- [3.] Monkhouse R. S. C., Wilcox, P., Cawley, P.: Flexible inter-digital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures. *Ultrasonics*, 35, 1997, 489-498
- [4.] Alers G. A., Burns L. R.: EMAT designs for special applications. *Mater. Eval.*, 45, 1987, 1184-1194