



(12) Translation of
European patent specification

(11) NO/EP 2637693 B1

NORWAY

(19) NO
(51) Int Cl.
G01V 1/00 (2006.01)
G01V 1/44 (2006.01)
G01V 1/46 (2006.01)
G01V 1/50 (2006.01)
G01V 1/52 (2006.01)
G10K 15/02 (2006.01)

Norwegian Industrial Property Office

(21)	Translation Published	2019.06.03
(80)	Date of The European Patent Office Publication of the Granted Patent	2019.01.16
(86)	European Application Nr.	11791671.8
(86)	European Filing Date	2011.11.09
(87)	The European Application's Publication Date	2013.09.18
(30)	Priority	2010.11.12, US, 413173 P
(84)	Designated Contracting States:	AL ; AT ; BE ; BG ; CH ; CY ; CZ ; DE ; DK ; EE ; ES ; FI ; FR ; GB ; GR ; HR ; HU ; IE ; IS ; IT ; LI ; LT ; LU ; LV ; MC ; MK ; MT ; NL ; NO ; PL ; PT ; RO ; RS ; SE ; SI ; SK ; SM ; TR
(73)	Proprietor	Chevron U.S.A. Inc., 6001 Bollinger Canyon Road, San Ramon, CA 94583, USA Los Alamos National Security, P.O. Box 1663, Mail Stop A187, Los Alamos, NM 87544, USA
(72)	Inventor	VU, Cung Khac, 2811 Lafayette Street, HoustonTexas 77005, USA NIHEI, Kurt T., 5839 Amy Dr., OaklandCalifornia 94618, USA JOHNSON, Paul A., 04 CR 113 South, Santa FeNew Mexico 87506, USA GUYER, Robert A., 2020 Dickerson Rd., RenoNevada 89503, USA TEN CATE, James A., 542 Todd Loop S, Los AlamosNew Mexico 87544, USA LE BAS, Pierre-Yves, 625 La Bajada, Los AlamosNew Mexico 87544, USA LARMAT, Carene S., 1051 11th Street, Los AlamosNew Mexico 87544, USA SKELT, C., 10219 Inwood Dr., Houston. TX 77042, USA
(74)	Agent or Attorney	TANDBERG INNOVATION AS, Postboks 1570 Vika, 0118 OSLO, Norge

(54)	Title	SYSTEM AND METHOD FOR GENERATING MICRO-SEISMIC EVENTS AND CHARACTERIZING PROPERTIES OF A MEDIUM WITH NON-LINEAR ACOUSTIC INTERACTIONS
------	-------	--

(56)	References Cited:	EP-A1- 0 519 810 US-A1- 2010 265 794 WO-A2-01/94983
------	-------------------	---

Enclosed is a translation of the patent claims in Norwegian. Please note that as per the Norwegian Patents Acts, section 66i the patent will receive protection in Norway only as far as there is agreement between the translation and the language of the application/patent granted at the EPO. In matters concerning the validity of the patent, language of the application/patent granted at the EPO will be used as the basis for the decision. The patent documents published by the EPO are available through Espacenet (<http://worldwide.espacenet.com>) or via the search engine on our website here: <https://search.patentstyret.no/>

Patentkrav

1. Fremgangsmåte ved generering av en mikroseismisk hendelse i et medium (20)
5 fra en ikke-lineær vekselvirkning for å karakterisere mediet (20), hvor fremgangsmåten omfatter å:

generere, ved en første akustisk kilde (12), et første kodet akustisk signal;

generere, ved en andre akustisk kilde (14), et andre kodet akustisk signal;

10 hvor den første akustiske kilden (12) og den andre akustiske kilden (14) kan styres slik at baner til det første og det andre akustiske signalet skjærer hverandre i en blandingssone inne i mediet (20);

motta, ved en mottaker (16), et detektert signal som inkluderer et tredje signal som er generert gjennom en ikke-lineær blandingsprosess fra det første akustiske signalet og det andre akustiske signalet i blandingssonen;

15 utføre, ved en prosessor, databehandling på det mottatte signalet eller korrelering med et kodet signalmønster, eller begge deler, for å trekke ut det tredje signalet generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen fra støy eller fra signaler generert gjennom en lineær vekselvirkningsprosess, eller begge, for å frembringe et emulert mikroseismisk hendelsessignal som oppstår i blandingssonen til
20 de første og andre akustiske signalene; og karakterisere egenskaper til mediet (20) eller skape et 3D-bilde av egenskapene til mediet (20) basert på det emulerte mikroseismiske hendelsessignalet,

karakterisert ved at:

25 det første akustiske signalet omfatter et første flertall pulser anordnet som en tidssekvens, hvor det første flertallet pulser er atskilt i tid, hvor hver puls omfatter et modulert signal med en senterfrekvens, hvor senterfrekvenser til to etterfølgende pulser er forskjellige;

og

30 det andre kodede akustiske signalet omfatter et andre flertall pulser anordnet som en tidssekvens, hvor det andre flertallet pulser er atskilt i tid, hvor en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser er den samme som en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to motsvarende pulser i det første flertallet pulser, hvor en

starttiddifferanse tilveiebringes mellom en starttid for en kringkasting av det andre flertallet pulser og en starttid for en kringkasting av det første flertallet pulser, hvor hver puls omfatter et modulert signal og en senterfrekvens til det modulerte signalet innenfor hver puls i det andre flertallet pulser er en valgt brøkdel d av senterfrekvensen til det modulerte signalet for den motsvarende pulsen i det første flertallet pulser.

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor det å generere det første kodede akustiske signalet omfatter å generere det første akustiske signalet slik at en atskillelse i tid mellom midtpunktene til to etterfølgende pulser i det første flertallet pulser er større enn en tidsvarighet til hver puls.

3. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor det tredje signalet som genereres gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen og mottas ved mottakeren omfatter et tredje flertall pulser som ankommer i en tidssekvens og atskilt i tid, hvor en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser er den samme som atskillelsen i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser i det første flertallet pulser,

hvor hver puls i det tredje flertallet pulser omfatter et modulert signal som har en senterfrekvens til hver puls som er lik en differanse mellom senterfrekvensen til den motsvarende pulsen av det første flertallet pulser og senterfrekvensen til den motsvarende pulsen av det andre flertallet pulser,

hvor en ankomsttid ved mottakeren til hver puls av det tredje flertallet pulser er tidsforsinket i forhold til en generering av en motsvarende puls av det første flertallet pulser med totalt en gangtid fra den første akustiske kilden til et midtpunkt av blandingssonen og en gangtid fra midtpunktet av blandingssonen til mottakeren.

4. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å gjenta genereringen av det første signalet, genereringen av det andre signalet, mottaket av det tredje signalet og utførelsen av databehandling eller korrelering med en kodet signalmønster, eller begge deler, for et område av starttiddifferanser og et område av frekvensbrøkdeler d for å frembringe signaler fra emulerte mikroseismiske hendelser generert i et flertall

blandingssoner.

5. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor det å generere det første signalet omfatter å generere et første signal som er en sum av et flertall pulser, hvor hver puls har en signalamplitude lik produktet av en omhyllingsfunksjon og en modulert signalfunksjon, og

hvor det å generere det andre signalet omfatter å generere et andre signal som er en sum av et flertall pulser, hvor hver puls har en signalamplitude lik produktet av en omhyllingsfunksjon og en modulert signalfunksjon.

6. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor det å generere det første signalet og det andre signalet omfatter å generere et første signal $u_1(t)$ og et andre signal $u_2(t)$ med formen:

$$u_1(t) = \sum_m E1_m(t - t_m) * \exp(i \omega_m * (t - t_m)) * \exp(i \zeta_m)$$

og

$$u_2(t - \delta) = \sum_m E2_m(t - (t_m + \delta)) * \exp(i d * \omega_m * (t - (t_m + \delta))) * \exp(i \zeta_m)$$

hvor

m er et indeksnummer knyttet til en puls;

$\sum$ angir en summasjon over indeks $m = 1$ til M , der M er et heltall større enn eller lik 1;

$E1_m(t - t_m)$ er en amplitudeomhyllingskurve til puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

$E2_m(t - t_m - \delta)$ er en amplitudeomhyllingskurve til puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

ω_m er senterfrekvensen til det modulerte signalet til puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

$(d*\omega_m)$ er senterfrekvensen til det modulerte signalet til puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

d er et frekvensforhold mellom frekvensen ω_m i det første flertallet pulser og frekvensen $d*\omega_m$ i det andre flertallet pulser, hvor d er et reelt positivt tall;

5 δ er starttiddifferansen mellom genereringen av det første akustiske signalet u_1 og det andre akustiske signalet u_2 ;

$\exp(i\omega_m*(t - t_m))$ er det modulerte signalet innenfor puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

10 $\exp(id*\omega_m*(t - t_m - \delta))$ er det modulerte signalet innenfor puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

t_m er tiden puls m genereres i det første akustiske signalet u_1 ;

$t_m + \delta$ er tiden puls m genereres i det andre akustiske signalet u_2 ; og

$\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m innenfor det første signalet u_1 eller det andre signalet u_2 .

15

7. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor signalet $u_3(t)$ som genereres gjennom en ikke-lineær blandingsprosess er på formen:

$$u_3(R, t) \propto \sum_n E3_m(t - t_m - T_1 - T_3) * \exp(i * (1 - d) * \omega_m * (t - t_m - T_1 - T_3)) * \exp(i\zeta_m)$$

20

hvor:

$E3_m(t - t_m - T_1 - T_3)$ er en omhyllingskurve til en puls i et tredje flertall pulser av signalet u_3 generert gjennom ikke-lineær blanding av det første signalet og det andre signalet,

25 $\exp(i*(1-d)*\omega_m*(t - t_m - T_1 - T_3))$ svarer til et tredje modulert signal innenfor den m-te pulsen i det tredje flertallet pulser,

$(1-d)*\omega_m$ er en frekvens til det modulerte signalet innenfor den m-te pulsen i det tredje flertallet pulser som er en differanse mellom senterfrekvensen ω_m til det første modulerte signalet innenfor den m-te pulsen av det første flertallet pulser og

30 senterfrekvensen $d*\omega_m$ til det andre modulerte signalet innenfor den m-te pulsen av det andre flertallet pulser,

d er et valgt frekvensforhold,

t er signaltiden,

R er merke for mottaker eller mottakerposisjon,

$(T_1 + T_3)$ er et tidspunkt den m-te pulsen i det tredje flertallet pulser ankommer

5 ved mottakeren, og

ζ_m er en fase til hver puls m og $\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m.

8. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å trekke ut, ved prosessoren, et signal generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen for å frembringe signalet
10 fra den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene ved å korrelere det detekterte signalet med et mønstersignal, hvor mønstersignalet omfatter et flertall pulser, hvor den tidsmessige atskillelsen mellom midtpunktet til flertallet pulser i mønstersignalet er den samme som den tidsmessige atskillelsen til midtpunktet til flertallet pulser i det første akustiske signalet og hvor
15 senterfrekvensen til flertallet pulser i det tredje signalet er en funksjon av senterfrekvensen til flertallet pulser i det første akustiske signalet og frekvensbrøkdelen d.

9. Fremgangsmåte ifølge krav 8, videre omfattende å øke et antall av det første
20 flertallet pulser og øke et antall av den andre flertallet pulser for å bedre skjelning av det tredje signalet generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen fra støy eller fra signaler generert gjennom en lineær vekselvirkningsprosess, eller begge.

10. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å trekke ut, ved prosessoren,
25 det tredje signalet generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen for å frembringe signalet fra den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene ved å korrelere det detekterte signalet med et mønstersignal, hvor mønsteret u_s er på formen:

$$30 \quad u_s(t) = \sum W_m(t - t_m) * \exp(i * g(\omega_m) * (t - t_m)) * \exp(i\zeta_m)$$

hvor:

$W_m(t-t_m)$ er en amplitudeomhyllingskurve til en m-te puls i mønstersignalet, $\exp(i * g(\omega_m) * (t-t_m))$ svarer til et modulert signal innenfor den m-te pulsen av flertallet pulser i mønstersignalet,

5 $g(\omega_m)$ er en valgt funksjon av det modulerte signalet som avhenger av frekvensbrøkdeler d , innenfor den m-te pulsen av flertallet pulser i mønsteret,

t er en forplantningstid,

t_m er et tidspunkt den m-te pulsen i flertallet pulser er simulert å ankomme ved mottakeren, og

10 ζ_m er en fase til hver puls n og $\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m .

11. Fremgangsmåte ifølge krav 10, videre omfattende å:

trekke ut, ved prosessoren, det tredje signalet fra den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene ved å korrelere
15 det detekterte signalet ved en mottaker R_i med et kodet mønstersignal $u_s(t)$, og

gjenta, for et flertall starttiddifferanser δ mellom det andre flertallet pulser og det første flertallet pulser og for et flertall frekvensforhold d mellom senterfrekvensen til det modulerte signalet innenfor hver puls i det andre flertallet pulser og senterfrekvensen til det modulerte signalet med hver motsvarende puls i det første
20 flertallet pulser, korreleringen mellom mønstersignalet og det detekterte signalet for å oppnå, for hver starttiddifferanse δ og for hvert frekvensforhold d , et korrelert signal for hver mottaker R_i angitt som $M(R_i, t)$, som inneholder emulerte mikroseismiske hendelser generert fjennom ikke-lineær vekselvirkning ved spesifikke blandingssteder i henhold til utvelgelsesregler for ikke-lineær vekselvirkning.

25

12. Fremgangsmåte ifølge krav 11, videre omfattende å beregne, for hver starttiddifferanse δ og for hvert frekvensforhold d og det motsvarende korrelerte signalet $M(R_i, t)$, de romlige koordinatene til emulerte mikroseismiske hendelser hvor de to akustiske signalene vekselvirker ikke-lineært med bruk av stedsanalyse og
30 gangtidsberegninger basert på en hastighetsmodell for kompresjons- eller

skjærbølgehastighet.

13. Fremgangsmåte ifølge krav 11, videre omfattende å anvende tidsreverseringsoperasjoner for å forplante bakover i tid signalene for de emulerte mikroseismiske hendelsene til tiden og opprinnelsesstedet for de mikroseismiske hendelsene med en forplantningshastighetsmodell.
14. Fremgangsmåte ifølge krav 13, videre omfattende å bestemme relative styrker til de mikroseismiske hendelsene på opprinnelsesstedene, hvor de relative styrkene på opprinnelsesstedene er proporsjonale med ikke-lineære egenskaper til mediet på opprinnelsesstedene til de mikroseismiske hendelsene.
15. Fremgangsmåte ifølge krav 11, videre omfattende å frembringe et tredimensjonalt bilde av de mikroseismiske hendelsene eller de ikke-lineære egenskapene til mediet, eller begge, ved å anvende Kirchhoff-avbildning, stråleavbildning, bølgelikningsavbildning eller tidsreverseringsmetoder fra de korrelerte signalene inneholdende emulerte mikroseismiske hendelser i blandingssoner til de første og andre akustiske signalene, hvor de korrelerte signalene frembringes fra signaler mottatt ved et flertall mottakere, hvor den første kilden og den andre kilden plasseres på forskjellige steder.
16. Fremgangsmåte ifølge krav 11, videre omfattende å gjenta genereringen av det første signalet ved den første kilden et flertall ganger ved å anordne den første kilden på et flertall steder og gjenta genereringen av det andre signalet ved den andre kilden et flertall ganger ved å anordne den andre kilden på et flertall steder; og gjenta mottaket av det tredje signalet et flertall ganger ved å anordne mottakeren på et flertall steder; og frembringe flere tredimensjonale bilder av de ikke-lineære egenskapene til mediet ved å anvende Kirchhoff-avbildning, stråleavbildning, bølgelikningsavbildning eller tidsreverseringsmetoder fra de korrelerte signalene inneholdende emulerte mikroseismiske hendelser i blandingssoner til de første og andre akustiske signalene,

hvor de korrelerte signalene frembringes fra signaler mottatt ved et flertall mottakere.

17. Fremgangsmåte ifølge krav 16, videre omfattende å oppdatere forplantningshastighetsmodellen gjennom hastighetstomografimetoder ved å minimere differansene i de flere tredimensjonale bildene fra mottatte signaler fra et flertall plasseringssteder for den første akustiske kilden og den andre akustiske kilden.

18. Fremgangsmåte ifølge krav 17, videre omfattende å oppdatere forplantningshastighetsmodellen og avbildningene iterativt til differansene mellom de frembragte flere bildene er minimert og kombinere de flere bildene for å skape et endelig tredimensjonalt bilde av ikke-lineære egenskaper til mediet eller det lokale hastighetsforholdet V_p/V_s , eller begge.

19. System for å generere en mikroseismisk hendelse i et medium (20) fra en ikke-lineær vekselvirkning for å karakterisere mediet (20), hvor systemet omfatter:

en første akustisk kilde (12) innrettet for å generere et første kodet akustisk signal;

en andre akustisk kilde (14) innrettet for å generere et andre kodet akustisk signal;

hvor den første akustiske kilden (12) og den andre akustiske kilden (14) kan styres slik at baner til det første og det andre akustiske signalet skjærer hverandre i en blandingssone inne i mediet (20);

en mottaker (16) innrettet for å motta et detektert signal, inkludert et tredje signal som er generert gjennom en ikke-lineær blandingsprosess fra det første

akustiske signalet og det andre akustiske signalet i blandingssonen; og

en prosessor innrettet for å utføre databehandling på det mottatte signalet eller korrelere med et kodet signalmønster, eller begge deler, for å trekke ut det tredje signalet generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen fra støy eller fra signaler generert gjennom en lineær vekselvirkningsprosess, eller begge, for å frembringe et emulert mikroseismisk hendelsessignal som oppstår i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene for med det å karakterisere egenskaper til

mediet (20) eller skape et 3D-bilde av egenskapene til mediet (20) basert på det emulerte mikroseismiske hendelsessignalet, karakterisert ved at:

det første kodede akustiske signalet omfatter en første flertall pulser anordnet som en tidssekvens, hvor det første flertallet pulser er atskilt i tid, hvor hver puls omfatter et modulert signal med en senterfrekvens, hvor senterfrekvenser til to etterfølgende pulser er forskjellige; og

det andre kodede akustiske signalet omfatter et andre flertall pulser anordnet som en tidssekvens, hvor det andre flertallet pulser er atskilt i tid, hvor en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser er den samme som en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to motsvarende pulser i det første flertallet pulser, hvor en starttiddifferanse blir tilveiebragt mellom en starttid for en kringkasting av det andre flertallet pulser og en starttid for en kringkasting av det første flertallet pulser, hvor hver puls omfatter et modulert signal og en senterfrekvens til det modulerte signalet innenfor hver puls i det andre flertallet pulser er en valgt brøkdel d av senterfrekvensen til det modulerte signalet for den motsvarende pulsen i det første flertallet pulser.

20. System ifølge krav 19, hvor den første akustiske kilden er innrettet å generere det første kodede akustiske signalet slik at en atskillelse i tid mellom midtpunktene til to etterfølgende pulser i det første flertallet pulser er større enn en tidsvarighet til hver puls.

21. System ifølge krav 19, hvor det tredje signalet som genereres gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen og mottas ved mottakeren omfatter et tredje flertall pulser som ankommer i en tidssekvens og atskilt i tid, hvor en atskillelse i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser er den samme som atskillelsen i tid mellom midtpunkter til to etterfølgende pulser i det første flertallet pulser,

hvor hver puls i det tredje flertallet pulser omfatter et modulert signal som har en senterfrekvens til hver puls som er lik en differanse mellom senterfrekvensen til den motsvarende pulsen av det første flertallet pulser og senterfrekvensen til den motsvarende pulsen av den andre flertallet pulser,

hvor en ankomsttid ved mottakeren til hver puls av det tredje flertallet pulser er tidsforsinket i forhold til en generering av en motsvarende puls av det første flertallet pulser med totalt en gangtid fra den første akustiske kilden til et midtpunkt av blandingssonen og en gangtid fra midtpunktet av blandingssonen til mottakeren.

5

22. System ifølge krav 19, hvor prosessoren er innrettet for å styre den første kilden og den andre kilden til å gjenta genereringen av det første signalet, genereringen av det andre signalet, for å styre mottakeren til å gjenta mottaket av det tredje signalet og for å gjenta utførelsen av databehandling eller korrelering med et kodet signalmønster, eller begge deler, for et område av starttiddifferanser og et område av frekvensbrøkdeler d for å frembringe signaler fra emulerte mikroseismiske hendelser generert i et flertall blandingssoner.

10

23. System ifølge krav 19, hvor den første akustiske kilden er innrettet for å generere et første signal som er en sum av et flertall pulser, hvor hver puls har en signalamplitude lik produktet av en omhyllingsfunksjon og en modulert signalfunksjon, og

15

hvor den andre akustiske kilden er innrettet for å generere et andre signal som er en sum av et flertall pulser, hvor hver puls har en signalamplitude lik produktet av en omhyllingsfunksjon og en modulert signalfunksjon.

20

24. System ifølge krav 19, hvor det første signalet omfatter et første signal $u_1(t)$ og det andre signalet omfatter et andre signal $u_2(t)$ med formen:

$$u_1(t) = \sum_m E1_m(t - t_m) * \exp(i \omega_m * (t - t_m)) * \exp(i \zeta_m)$$

25

og

$$u_2(t - \delta) = \sum_m E2_m(t - (t_m + \delta)) * \exp(i d * \omega_m * (t - (t_m + \delta))) * \exp(i \zeta_m)$$

30

hvor

m er et indeksnummer knyttet til en puls;

$\sum$ angir en summasjon over indeks $m = 1$ til M , der M er et heltall større enn eller lik 1;

5 $E1_m(t - t_m)$ er en amplitudeomhyllingskurve til puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

$E2_m(t - t_m - \delta)$ er en amplitudeomhyllingskurve til puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

10 ω_m er senterfrekvensen til det modulerte signalet til puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

$(d^*\omega_m)$ er senterfrekvensen til det modulerte signalet til puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

d er et frekvensforhold mellom frekvensen ω_m til det første flertallet pulser og frekvensen $d^*\omega_m$ til det andre flertallet pulser, hvor d er et reelt positivt tall;

15 δ er starttiddifferansen mellom genereringen av det første akustiske signalet u_1 og det andre akustiske signalet u_2 ;

$\exp(i\omega_m^*(t - t_m))$ er det modulerte signalet innenfor puls m av det første akustiske signalet u_1 ;

20 $\exp(id^*\omega_m^*(t - t_m - \delta))$ er det modulerte signalet innenfor puls m av det andre akustiske signalet u_2 ;

t_m er tiden puls m blir generert i det første akustiske signalet u_1 ;

$t_m + \delta$ er tiden puls m blir generert i det andre akustiske signalet u_2 ; og

$\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m innenfor det første signalet u_1 eller det andre signalet u_2 .

25

25. System ifølge krav 19, hvor signalet $u_3(t)$ som genereres gjennom en ikke-lineær blandingsprosess er på formen:

$$u_3(R, t) \propto \sum_n E3_m(t - t_m - T_1 - T_3) * \exp(i * (1 - d) * \omega_m * (t - t_m - T_1 - T_3)) * \exp(i\zeta_m)$$

30

hvor:

$E3_m(t - t_m - T_1 - T_3)$ er en omhyllingskurve til en puls i et tredje flertall pulser av signalet u_3 generert gjennom ikke-lineær blanding av det første signalet og det andre signalet,

$\exp(i*(1-d)*\omega_m*(t - t_m - T_1 - T_3))$ svarer til et tredje modulert signal innenfor den

5 m-te pulsen i det tredje flertallet pulser,

$(1-d)*\omega_m$ er en frekvens til det modulerte signalet innenfor den m-te pulsen i det tredje flertallet pulser som er en differanse mellom senterfrekvensen ω_m til det første modulerte signalet innenfor den m-te pulsen av det første flertallet pulser og senterfrekvensen $d*\omega_m$ til det andre modulerte signalet innenfor den m-te pulsen av det

10 andre flertallet pulser,

d er et valgt frekvensforhold,

t er signaltiden,

R er merke for mottaker eller mottakerposisjon,

$(T_1 + T_3)$ er et tidspunkt den m-te pulsen i det tredje flertallet pulser ankommer

15 ved mottakeren, og

ζ_m er en fase til hver puls m og $\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m .

26. System ifølge krav 19, hvor prosessoren er innrettet for å trekke ut et signal generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen for å frembringe signalet fra

20 den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene ved å korrelere det detekterte signalet med et mønstersignal, hvor mønstersignalet omfatter et flertall pulser, hvor den tidsmessige atskillelsen mellom midtpunktet til flertallet pulser i mønstersignalet er den samme som den tidsmessige atskillelsen til midtpunktet til flertallet pulser av det første akustiske signalet og hvor

25 senterfrekvensen til flertallet pulser i det tredje signalet er en funksjon av senterfrekvensen til flertallet pulser i det første akustiske signalet og frekvensbrøkdelen d .

27. System ifølge krav 19, hvor prosessoren er innrettet for å trekke ut det tredje

30 signalet generert gjennom den ikke-lineære blandingsprosessen for å frembringe signalet fra den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og

andre akustiske signalene ved å korrelere det detekterte signalet med et mønstersignal, hvor mønsteret u_s er på formen:

$$u_s(t) = \sum_n W_m(t - t_m) * \exp(i * g(\omega_m) * (t - t_m)) * \exp(i\zeta_m)$$

5

hvor:

$W_m(t - t_m)$ er en amplitudeomhyllingskurve til en m-te puls i mønstersignalet, $\exp(i * g(\omega_m) * (t - t_m))$ svarer til det modulerte signalet innenfor den m-te pulsen av flertallet pulser i mønstersignalet,

10

$g(\omega_m)$ er en valgt funksjon av det modulerte signalet som avhenger av frekvensbrøkdel d , innenfor den m-te pulsen i flertallet pulser i mønsteret, t er en forplantningstid,

t_m er et tidspunkt den m-te pulsen i flertallet pulser er simulert å ankomme ved mottakeren, og

15

ζ_m er en fase til hver puls n og $\exp(i\zeta_m)$ er et faseledd til hver puls m .

28. System ifølge krav 27, videre omfattende:

hvor prosessoren er innrettet for å trekke ut det tredje signalet fra den emulerte mikroseismiske hendelsen i blandingssonen til de første og andre akustiske signalene ved å korrelere det detekterte signalet ved en mottaker R_i med et kodet mønstersignal $u_s(t)$, og

20

gjenta, for et flertall starttiddifferanser δ mellom det andre flertallet pulser og det første flertallet pulser og for et flertall frekvensforhold d mellom senterfrekvensen til det modulerte signalet innenfor hver puls i den andre flertallet pulser og

25

senterfrekvensen til det modulerte signalet med hver motsvarende puls i det første flertallet pulser, korreleringen mellom mønstersignalet og det detekterte signalet for å oppnå, for hver starttiddifferanse δ og for hvert frekvensforhold d , et korrelert signal for hver mottaker R_i angitt som $M(R_i, t)$, som inneholder emulerte mikroseismiske hendelser generert gjennom ikke-lineær vekselvirkning på spesifikke blandingssteder i overensstemmelse med utvelgelsesregler for ikke-lineær vekselvirkning.

30

29. System ifølge krav 28, hvor prosessoren er innrettet for å beregne, for hver starttiddifferanse δ og for hvert frekvensforhold d og det motsvarende korrelerte signalet $M(R_i, t)$, de romlige koordinatene til emulerte mikroseismiske hendelser hvor de to akustiske signalene vekselvirker ikke-lineært med bruk av stedsanalyse og gangtidsberegninger basert på en hastighetsmodell for kompresjons- eller skjærbølgehastighet.
30. System ifølge krav 28, hvor prosessoren er innrettet for å anvende tidsreverseringsoperasjoner for å forplante bakover i tid signalene for de emulerte mikroseismiske hendelsene til tiden og opprinnelsesstedet til de mikroseismiske hendelsene med en forplantningshastighetsmodell.
31. System ifølge krav 30, hvor prosessoren er innrettet for å bestemme relative styrker til de mikroseismiske hendelsene på opprinnelsesstedene, hvor de relative styrkene på opprinnelsesstedene er proporsjonale med ikke-lineære egenskaper til mediet på opprinnelsesstedene til de mikroseismiske hendelsene.
32. System ifølge krav 30, hvor prosessoren er innrettet for å frembringe et tredimensjonalt bilde av de mikroseismiske hendelsene eller de ikke-lineære egenskapene til mediet, eller begge, ved å anvende Kirchhoff-avbildning, stråleavbildning, bølgelikningsavbildning eller tidsreverseringsmetoder fra de korrelerte signalene inneholdende emulerte mikroseismiske hendelser i blandingssonene til de første og andre akustiske signalene, hvor de korrelerte signalene blir frembragt fra signaler mottatt ved et flertall mottakere, hvor den første kilden og den andre kilden er plassert på forskjellige steder.
33. System ifølge krav 30, hvor prosessoren er innrettet for å styre den første kilden og den andre kilden til å gjenta genereringen av det første signalet ved den første kilden et flertall ganger ved å anordne den første kilden på et flertall steder og gjenta genereringen av det andre signalet ved den andre kilden et flertall ganger ved å

anordne den andre kilden på et flertall steder; gjenta mottaket av det tredje signalet et flertall ganger ved å anordne mottakeren på et flertall steder; og frembringe flere tredimensjonale bilder av de ikke-lineære egenskapene til mediet ved å anvende Kirchhoff-avbildning, stråleavbildning, bølgelikningsavbildning eller

- 5 tidsreverseringsmetoder fra de korrelerte signalene inneholdende emulerte mikroseismiske hendelser i blandingssoner til de første og andre akustiske signalene, hvor de korrelerte signalene er frembragt fra signaler mottatt ved et flertall mottakere.

34. System ifølge krav 33, hvor prosessoren er innrettet for å oppdatere
10 forplantningshastighetsmodellen gjennom hastighetstomografimetoder for å minimere differansene i de flere tredimensjonale bildene fra mottatte signaler fra et flertall plasseringssteder for den første akustiske kilden og den andre akustiske kilden.

35. System ifølge krav 34, hvor prosessoren er innrettet for å oppdatere
15 forplantningshastighetsmodellen og for å utføre avbildning iterativt til differansene mellom de frembragte flere bildene er minimert og kombinere de flere bildene for å skape et endelig tredimensjonalt bilde av ikke-lineære egenskaper til mediet eller det lokale hastighetsforholdet V_p/V_s , eller begge.