

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-503539  
(P2005-503539A)

(43) 公表日 平成17年2月3日(2005.2.3)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
GO 1 V 3/12	GO 1 V 3/12	B
GO 1 S 7/03	GO 1 S 7/03	L
GO 1 S 13/88	GO 1 S 13/88	G

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 83 頁)

(21) 出願番号 特願2002-584015 (P2002-584015)	(71) 出願人 503383734 ビットェン, アラン ジェイ. アメリカ合衆国 オクラホマ 73072 ノーマン, リバー ウォーク コー ト 3308
(86) (22) 出願日 平成14年4月22日 (2002.4.22)	
(85) 翻訳文提出日 平成15年10月20日 (2003.10.20)	
(86) 国際出願番号 PCT/US2002/008274	
(87) 国際公開番号 W02002/086542	
(87) 国際公開日 平成14年10月31日 (2002.10.31)	(74) 代理人 100078282 弁理士 山本 秀策
(31) 優先権主張番号 60/284, 921	(74) 代理人 100062409 弁理士 安村 高明
(32) 優先日 平成13年4月20日 (2001.4.20)	(74) 代理人 100113413 弁理士 森下 夏樹
(33) 優先権主張国 米国 (US)	(72) 発明者 ビットェン, アラン ジェイ. アメリカ合衆国 オクラホマ 73072 ノーマン, リバー ウォーク コー ト 3308
(31) 優先権主張番号 10/118, 991	
(32) 優先日 平成14年4月10日 (2002.4.10)	
(33) 優先権主張国 米国 (US)	

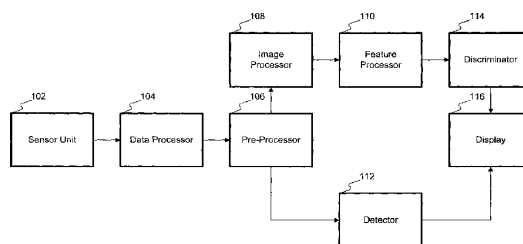
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 地中探索レーダを用いて埋められている物体を識別するための方法および装置

(57) 【要約】

少なくとも1つのGPRセンサ102を含むシステムにおいて地中探索レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための装置は、GPRセンサ102から受信されたデータにおける空間的相関を検出するための、装置内部のデータプロセッサ104、データプロセッサ104によって処理されたデータから埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築することが可能な画像プロセッサを含む。GPRセンサを含むシステムにおいて、GPRを用いて埋められている物体を識別するための方法は、システム内のGPRセンサから受信されたデータにおける空間相関を検出するステップと、受信されたデータから埋められている物体の画像に対応するデータ構造108を構築するステップとを含む。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

少なくとも 1 つの地中探査レーダ ( G P R ) センサを含むシステムにおいて、地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するための装置であって、データプロセッサであって、該少なくとも 1 つの G P R センサから受信されたデータにおける該埋められている物体に対応する空間相関性を検出するための手段と、波速度計算器とを含むデータプロセッサと、該検出するための手段および該波速度計算器を用いて該データプロセッサによって処理されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するための画像プロセッサと、該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するための弁別器とを含む、地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するための装置。

10

## 【請求項 2】

前記データプロセッサは、モノスタティックデータプロセッサをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 3】

前記データプロセッサは、マルチスタティックデータプロセッサをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

20

## 【請求項 4】

前記データプロセッサは、時間アライメント計算器を含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 5】

前記データプロセッサは、インパルス応答関数計算器を含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 6】

所望されない物体を前記受信されたデータから除去すること、または該受信されたデータにおける関心のあるターゲットを許容することの内の少なくとも 1 つを可能にするプリプロセッサをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 7】

前記埋められている物体を識別することを可能にする検出器をさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

30

## 【請求項 8】

情報管理システムへのデータリンクをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 9】

前記埋められている物体の画像を表示するためのディスプレイをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 10】

前記埋められている物体を表す画像を前記地上に投影するディスプレイをさらに含む、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 11】

少なくとも 1 つの G P R センサを含む地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するための装置であって、該少なくとも 1 つの G P R センサから収集されたデータを処理して、該データから少なくとも 1 つの該埋められている物体の識別可能なフィーチャを抽出するためのデータプロセッサと、該少なくとも 1 つの識別可能なフィーチャから該埋められている物体を識別することが可能な検出器とを含む、物体を識別するための装置。

40

## 【請求項 12】

前記検出器は、特定された深さの範囲に該検出器を向けるための深さインジケータをさら

50

に含む、請求項 1 1 に記載の装置。

【請求項 1 3】

前記検出器は、特定された屈折率の範囲内の物体に該検出器を向けるための屈折率インジケータをさらに含む、請求項 1 1 に記載の装置。

【請求項 1 4】

少なくとも 1 つの G P R センサを含む地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するためのモバイルシステムであって、

該物体が埋められている地層に沿って該モバイルシステムを移動させるためにモバイルハウジングと、

該モバイルハウジングにおいて取り付けられたデータプロセッサであって、

該埋められている物体に対応する空間相関を、該少なくとも 1 つの G P R センサから受信されたデータ内で検出するための手段と、

波速度計算器と

を含むデータプロセッサと、

該検出するための手段および該波速度計算器を用いて該データプロセッサによって処理されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するためのモバイルハウジング内に取り付けられた画像プロセッサと、

該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するために該モバイルハウジング内に取り付けられた弁別器と

を含む、地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するためのモバイルシステム。

【請求項 1 5】

前記データプロセッサは、モノスタティックまたはマルチスタティックデータプロセッサの内の少なくとも 1 つをさらに含む、請求項 1 4 に記載のモバイルシステム。

【請求項 1 6】

前記埋められている物体の画像を表示するためのディスプレイをさらに含む、請求項 1 4 に記載のモバイルシステム。

【請求項 1 7】

少なくとも 1 つの地中探査レーダ ( G P R ) センサを含む地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するためのポータブルシステムであって、

オペレータによる携帯に適するハウジングと、

該ハウジング内に取り付けられたデータプロセッサであって、

該埋められている物体に対応する空間相関を該少なくとも 1 つの G P R センサから受信されたデータにおいて検出するための手段と、

波速度計算器と

を含むデータプロセッサと、

該検出するための手段および該波速度計算器を用いて該データプロセッサによって処理されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するためにハウジング内に取り付けられた画像プロセッサと、

該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するために該ハウジング内に取り付けられた弁別器と

を含む、地中探査レーダ ( G P R ) を用いて埋められている物体を識別するためにポータブルシステム。

【請求項 1 8】

前記データプロセッサは、モノスタティックまたはマルチスタティックデータプロセッサの内の少なくとも 1 つをさらに含む、請求項 1 7 に記載のポータブルシステム。

【請求項 1 9】

前記埋められている物体の画像を表示するためのディスプレイをさらに含む、請求項 1 7 に記載のポータブルシステム。

【請求項 2 0】

10

20

30

40

50

少なくとも1つの地中探査レーダ(GPR)センサを含むシステムにおいて、地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための方法であって、  
該埋められている物体に対応する空間相関を該少なくとも1つのGPRセンサから受信されたデータにおいて検出するステップと、  
該受信されたデータに関連付けられた波速度を計算するステップと、  
該受信されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するステップと、  
該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するステップと  
を含む、地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための方法。

【請求項21】

10

前記空間相関を検出するためのステップは、少なくとも1つのモノスタティックまたはマルチスタティックデータプロセッサを用いて受信されたデータを処理するサブステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項22】

前記空間相関を検出するステップは、インパルス応答を計算するサブステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項23】

前記受信されたデータを時間アライメントするステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項24】

20

前記受信されたデータから望ましくない物体を除去すること、または該受信されたデータにおける関心のあるターゲットを許容することの内の少なくとも1つを実行するステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項25】

前記埋められている物体の画像を表示するステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項26】

前記埋められている物体の画像を地上に投影するステップをさらに含む、請求項20に記載の方法。

【請求項27】

30

少なくとも1つの地中探査レーダ(GPR)センサを含むシステムにおいて、地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための装置であって、  
データを処理するための手段であって、  
該埋められている物体に対応する空間相関を該少なくとも1つのGPRセンサから受信されたデータにおいて検出するための手段と、  
波速度を計算するための手段と  
を含むデータを処理するための手段と、  
該検出するための手段および該波速度を計算するための手段を用いて該データ処理のための手段によって処理されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するための手段と、  
該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するための手段と  
を含む、地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための装置。

40

【請求項28】

地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するために適応された、コンピュータにおける使用のためのコンピュータプログラム製品であって、該コンピュータプログラム製品は、コンピュータ読み出し可能なコード手段を格納するためのコンピュータ読み出し可能な媒体を含み、コンピュータによって実行された場合、該コンピュータが埋められている物体を識別することを可能にし、該コンピュータ読み出し可能なコード手段は、  
該埋められている物体に対応する空間相関を、少なくとも1つのGPRセンサから受信さ

50

れたデータにおいて検出するステップと、  
該受信されたデータに関連付けられた波速度を計算するステップと、  
該受信されたデータから該埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するステップと、  
該データ構造におけるデータから該埋められている物体を識別するステップと  
を含む方法をコンピュータに実行させるためのコンピュータ読み出し可能な命令を含む、  
コンピュータプログラム製品。

【請求項 29】

前記コンピュータ読み出し可能なコード手段は、前記コンピュータに、  
モノスタティックまたはマルチスタティックデータプロセッサの内の少なくとも1つを用  
いて受信されたデータを処理するステップを実行させるためのコンピュータ読み出し可能  
な命令をさらに含む、請求項 28 に記載のコンピュータプログラム製品。 10

【請求項 30】

前記コンピュータ読み出し可能なコード手段は、前記コンピュータに、  
前記受信されたデータを時間アライメントするステップを実行させるためのコンピュータ  
読み出し可能な命令をさらに含む、請求項 29 に記載のコンピュータプログラム製品。

【請求項 31】

埋められている物体を識別するための地中探査レーダ (GPR) システムにおけるデータ  
を処理するための方法であって、  
時間アライメント計算器と、  
波速度計算器と  
を含む、埋められている物体を識別するための地中探査レーダ (GPR) システムにおけ  
るデータプロセッサ。 20

【請求項 32】

埋められている物体を識別するための地中探査レーダ (GPR) システムにおけるデータ  
プロセッサであって、  
少なくとも1つのGPRセンサから受信されたデータを時間アライメントするステップと  
、  
該時間アライメントされたデータに関連付けられた波速度を計算するステップと  
を含む、埋められている物体を識別するための地中探査レーダ (GPR) システムにおけ  
るデータを処理するための方法。 30

【請求項 33】

地中探査レーダ (GPR) を用いて埋められている物体を識別するために適応されたコン  
ピュータにおける使用のためのコンピュータプログラム製品であって、該コンピュータプ  
ログラム製品は、コンピュータ読み出し可能なコード手段を格納するためのコンピュータ  
読み出し可能媒体を含み、該コンピュータによって実行された場合、該コンピュータが埋  
められている物体を識別することを可能にし、該コンピュータ読み出し可能なコード手段  
は、  
少なくとも1つのGPRセンサから受信されたデータを時間アライメントするステップと  
、  
該時間アライメントされたデータに関連付けられた波速度を計算するステップと  
を含む方法をコンピュータに実行させるためのコンピュータ読み出し可能な命令を含む、  
コンピュータプログラム製品。 40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(発明の背景)

本発明は、地中探査レーダ (GPR) システムおよび方法に関し、より詳細には、埋めら  
れている物体を識別するための地中探査レーダシステムおよび方法に関する。

【背景技術】

## 【0002】

GPRは、アンテナレイが地中に向けられることを除いて、航空交通制御および測量的ために使用される上方探査レーダ(upward-looking radar)と同様であり、このため全体的に異なる技術的課題のセットを提示する。例えば、GPRは地中層のマッピング、処置のための有毒廃棄物場所の探査、および未爆発の地中構造物(ordnance)検査等の物理探査用途のために使用される。

## 【0003】

GPRシステムは、電磁インパルス、持続波、または掃引周波数信号(例えば、1MHz~10GHzの周波数範囲で)伝送する少なくとも1つのトランスミッタを含む。このシステムはまた、反射された波形を受信する少なくとも1つのレシーバを含む。インパルスは、伝送されるべき波長に対して短い。実際には、インパルスは、例えば1または2サイクルであり得る。従って、GPRシステムは、時には「インパルス」レーダと呼ばれる。

10

## 【0004】

地中産業(subsurface industry)、建設、公共物(utility)探査、環境処置、および不爆発構造物の検出は、「地中を探査する」ための安全で、信頼できる、コスト効率的な方法が長い間探索されてきた。公共物探査市場は、数百万ドルの損害、遅延、公益企業および建設業者の毎年の損失財源、およびGPRユーザによって著しく低減され得る損失を生じる不適切な探査技術から大幅に影響を受ける。3つの公共物探査市場セグメントが、正確性および価格によって区別され得る。すなわち、(1)ワンコール(One Call)、(2)個人の探査、および(3)地中公共物エンジニアリング(SUE)である。

20

## 【0005】

「ワンコール」は、建築物がそのラインにいつおよびどこで影響を与え得るかについて、全ての公共物および個人物への警告を提供する全国的なクリーニングハウスである。法律によって、建設業者は、ワンコールでその場所に登録しなければならない。次いで、建設業者が公共物ラインを特定し得るように全ての関連する公共物と接触する。ワンコール探査システムは、電磁誘導技術に基づく。ワンコール作業の注文に回答する公益企業は、深さの保証はないが、各側上の水平方向に24インチ内部の導電性ラインに関する精度を保証する。ワンコールによって、公共物ラインの探査は、単に地上で一時的に塗りつぶされるだけであり、容易に腐食または破壊の影響を受ける。この低い精度は、破壊された公共物ラインおよび財源損失を生じる。

30

## 【0006】

建設、公益、および工業会社は、しばしば「個人探査」に依存する。個人探査は、ワンコールによって送達されたものより高い精度を提供する。これらの会社は、しばしば、より高価かつ時間のかかる探査技術を適用するために公共探査企業または物理探査企業を雇う。個人探査企業は、典型的には、電磁誘導技術、GPR、および磁気測定を使用する。しばしば、これは、公共物の正確な場所を決定するための最も信頼できかつ高価な方法である掘削を含む。

## 【0007】

しかし、工業および公益企業は、しばしば、ワンコールまたは個人探査が提供し得るよりもより正確な地中のマップを必要とする。例えば、パイプの破壊の増大により、オイルパイプライン付近を掘削する間、さらなる精度が必要とされ得る。あるいは、重要な通信を運ぶ州間の光ファイバーケーブルの偶発的な切断は非常に高価である。このような状況では、掘削者は、リスク/コストの回避の考慮を含む全体のコスト/価値解析を実行する。しばしば、掘削者は、より大きな精度を保証するためにより高い料金を支払うことになる。

40

## 【0008】

「SUE」は、ワンコールまたは個人探査よりもより高い精度を提供し得る。SUEは、物理探査およびエンジニアリング企業によって注文された急速成長特殊サービスである。これは、高速道路または他の大規模インフラストラクチャ建設の前に、計画および設計す

50

る公共物手配に係る。SUEエンジニアは、種々の従来の物理探査情報を用いて所与のサイトにおける識別可能な公共物の全てを厳密にマッピングする。SUEは、電磁誘導技術、GPR、および磁気測定を使用する。これは、概して、個人探査サービスよりもより高価である。なぜなら、これは、公共物の場所の永久的な記録を生成するためにコンピュータ支援設計を使用するためである。このプレミアムサービスでさえも、しばしば、未知の非導電公共物が存在する場合に、80%の確実性で公共物をより少ない頻度で識別するだけである。さらに、SUEは非常に高価である。それにより、従って、従来の技術の制限を克服するシステムに対する必要性が存在する。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0009】

(発明の要旨)

本発明は、地中探査レーダを用いて埋められている物体を識別するための方法論を提供する。本発明のさらなる特性および利点は、以下の説明において説明され、これは、部分的に背説明から明らかになるか、または本発明を実施することによって理解され得る。本発明の目的および他の利点は、記載された説明および特許請求の範囲、および添付の図面に特に指摘された、本方法ならびに装置によって実現かつ取得される。

【0010】

具現化され広範に説明されたように、本発明の目的によるこれらおよび他の利点を達成するために、本発明による装置および方法は、GPRを用いて埋められている物体を識別する。少なくとも1つのGPRセンサを含むシステムにおいて、地中探査レーダ(GPR)を用いて埋められている物体を識別するための装置は、装置中のGPRセンサから受け取られたデータにおける空間的相関を検出するためのデータプロセッサ、およびデータプロセッサによって処理されたデータから埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築することが可能な画像プロセッサを含む。GPRセンサを含むシステムにおいて、GPRを用いて埋められている物体を識別するための方法は、システムにおけるGPRセンサから受信されたデータにおける空間的相関を検出するステップおよび受信されたデータから埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築するステップを含む。

【0011】

上記一般的な説明および以下の詳細な説明の両方は、例示的かつ模範的であり、主張されたように本発明のさらなる説明を提供することが意図される。

【0012】

説明の構成部分において組み込まれた添付図面は、上記に与えられた一般的な説明および以下に与えられた実施形態の詳細な説明と共に本発明の実施形態を説明し、本発明の原理を説明するのに役立つ。

【0013】

(発明の詳細な説明)

地中探査レーダを用いて埋められている物体を識別するための方法およびシステムが説明される。図1は、本発明と一致する地中探査レーダを用いて埋められている物体を識別するための装置の実施形態である。図1の装置は、センサユニット102、データプロセッサ104、プリプロセッサ106、画像プロセッサ108、フィーチャプロセッサ110、検出器112、弁別器114、およびディスプレイ116を含む。

【0014】

図2は、センサユニット102の詳細な図である。本発明に一致するセンサユニット102の実施形態は、送信アンテナ202および受信アンテナ204を含む。送信アンテナ202は、埋められている物体の探索のために使用されるGPR波を出射する。送信されたGPR波が地中からおよび地中の下に位置する物体から反射される場合、受信アンテナ204は、送信されたGPR波を受信する。センサユニット102は、送信されたGPR信号の特性を制御し(いくつかの例では、以下により詳細に説明されるようにデータプロセッサ104からのサポートを受信する)、反射された信号を受信する。本発明に対する適

10

20

30

40

50

切なアンテナは、例えば、少なくとも2つのオクターブにわたる周波数応答を有する広いビームパターンを有する小さい広帯域幅アンテナを含む。

【0015】

当業者は、送信アンテナ202および受信アンテナ204におけるアンテナエレメントの構成に対する多くの適切なジオメトリが存在することを理解する。例えば、本発明と一致する3つの適切なアンテナジオメトリが図3に示される。アンテナ302は、一直線で配置されたアンテナトランスミッタ(「T」)およびレシーバ(「R」)を有し、トランスミッタおよびレシーバエレメントを交互に配置している。アンテナ304は、1つの口ウのトランスミッタエレメントおよび平行な口ウのレシーバエレメントを有する。アンテナ306は、1つの口ウのトランスミッタエレメントおよび平行な口ウのレシーバエレメントを有し、レシーバエレメントの口ウがトランスミッタエレメントの口ウからオフセットしている。各アンテナは、同じ分極を有してもよいし、分極がアンテナ間で変動してもよい。本発明と一致するさらなるアンテナ配置は、「Ground Penetrating Radar Array and Timing Circuit」と題された、2001年3月15日に公開されたW.O.01/18561A2に説明される。この全体を本明細書中で参考として援用する。

10

【0016】

図3は、アンテナエレメントのアレイから構成されたセンサユニットを示すが、本発明に一致するセンサユニット102の実施形態は、アレイを用いてデータ取得をシミュレートするために、データ取得の間に移動される1対の送信および受信アンテナエレメントを含む。例示的实施形態がアンテナエレメントのアレイを用いて議論されるこの用途全体を通して、当業者は、このような送信/受信アンテナ対がアレイの代わりにまたはアレイとの組み合わせで使用され得ることを理解する。

20

【0017】

平坦な表面(例えば地中)にわたってデータを取得するために、センサユニット102におけるアンテナは、好適には、送信および受信アンテナアレイによって形成された直線に垂直である方向に移動される。例えば、図4は、一直線のトランスミッタおよびレシーバアンテナエレメントを有するアンテナアレイ構成302における移動の方向(矢印によって示される)の例を示す。図5は、図4に示されたアレイ構成およびスキャン方向を用いて、3つの異なる時間ステップ $t_0$ 、 $t_1$ 、および $t_2$ (それぞれ図5(a)、図5(b)、図5(c))におけるデータ取得の概略図である。図5(a)に示されたように、時間 $t_0$ において、固定された位置 $x_0$ においてアレイ内の全てのアンテナにわたってデータが取得される。時間 $t_1$ において、アンテナアレイは、好適には、固定された量 $x$ だけ位置 $x_1$ まで移動される(図5(b))。位置 $x_1$ において1回、新しい位置においてアレイ内の全てのアンテナにわたってデータが取得される。図5(b)および5(c)は、以前の時間ステップでのアンテナエレメントの場所を示す、陰影を付けた(shaded)アンテナアレイエレメントを含む。時間 $t_2$ において、アンテナアレイは、固定された量 $x$ だけ位置 $x_2$ まで再度移動される(図5(c))。位置 $x_2$ において1回、新しい位置においてアレイ内の全てのアンテナにわたってデータが取得される。このプロセスは、埋められている物体上の関心のある領域をスキャンするのに十分な複数の反復を継続する。さらに、このスキャンはまた、非直線(例えば、 $x$ は、各時間間隔で固定されない)であり得ることに留意すること。

30

40

【0018】

データプロセッサ104は、図4および図5に示されたように、データが取得されるとセンサユニット102の適切な動作を確実にする制御信号を生成し得る。さらに、データプロセッサ104は、センサユニット102によって受信されたデータを処理する。本発明に一致するセンサユニット102およびデータプロセッサ104を用いてデータを取得および処理するための2つの技術は、モノスタティックおよびマルチスタティック処理である。モノスタティックデータ取得では、データプロセッサ104は、送信および受信アンテナが、取得されたデータが調和して移動される一対のアンテナをシミュレートするよう

50



に一对にすることを想定する。図6は、モノスタティックデータ取得のためのセンサユニット102の構成におけるアンテナレイエメントの概略図である。図6(a)に示されるように、期間 $t_0$ の間、センサユニット102は、送信アンテナエレメント602aを出射し、次いで受信アンテナエレメント602bは、反射されたGPR信号を記録する。期間 $t_1$ の間、センサユニット102は、次の送信および受信アンテナエレメント604aおよび604bそれぞれをレイ内でアクティブにする(図6(b))。残りの送信および受信アンテナエレメントは、連続時間間隔において対でアクティブにされる。例えば、送信エレメント606aおよび受信エレメント606bが期間 $t_2$ (図6(c))の間にアクティブにされ、送信エレメント608aおよび受信エレメント608bが期間 $t_3$ (図6(d))の間にアクティブにされる等である。本発明に一致するモノスタティックデータ取得の代替的な実施形態は、トランスミッタが1より多いのレシーバまたはレシーバが1つより多いのトランスミッタと対にされ得る。本発明に一致するデータプロセッサ104の実施形態は、センサユニット102が埋められている物体を表すデータを取得する態様を理解するモノスタティックデータプロセッサを含む。次いでモノスタティックデータプロセッサは、データを処理して、埋められている物体を表す信号を抽出する。

10

20

30

40

50

**【0019】**

図7は、マルチスタティックデータ取得の概略図である。マルチスタティック(時にはバイスタティックとも呼ばれる)データ取得モードでは、データは、各期間において夫々のトランスミッタに対する全てのレシーバにおいて取得される。本発明に一致するセンサユニット102の実施形態では、期間 $t_0$ の間、送信エレメント702が送り、受信エレメント704~718の各々が反射されたGPR波を記録する(図7(a))。期間 $t_1$ の間、送信エレメント720が出射し、受信エレメント704~718の各々が反射されたGPR波を記録する(図7(b))。以後の期間 $t_2$ (図7(c))および $t_3$ (図7(d))の間、送信エレメント722および724の各々が出射することにより、GPR波が受信エレメント704~718によって記録される。データ取得プロセッサ102が送信アンテナエレメントの各々をアクティブにするまで、連続的時間間隔にわたってこの処理が継続する。上述のように、マルチスタティックデータ取得のこの技術は、レイを用いてデータ取得をシミュレートするように、一对のアンテナエレメントを移動させることによって実行され得ることに留意すること。

**【0020】**

本発明に一致するデータプロセッサ104の実施形態は、センサユニット102が埋められている物体を表すデータを取得する態様を認識するマルチスタティックデータプロセッサを含む。次いで、マルチスタティックデータプロセッサはデータを処理して、埋められている物体を表す信号を抽出する。本発明に一致するマルチスタティックデータ取得プロセッサの実施形態は、各レシーバに対する専用データ取得チャンネルまたはいくつかより少数のデータ取得チャンネルを介して連続的に多重化するマルチプレクサのいずれかを有する。

**【0021】**

動作を含む上述の他の動作の中でも、当業者が理解する動作を含むことは、本発明と一致し、図1の装置におけるデータプロセッサ104は、例えば、時間アライメント、波速度の解析、およびインパルス応答関数計算(例えば、ビームパターン、およびスペクトル応答計算を含み得る)の内の1以上を含むシステム較正動作を実行する。これらの動作の各々は、以下に詳細に説明される。一般的に、データプロセッサ104は、センサユニット102から受信されたデータを処理して、測量された領域に埋められている物体に対応する意味のある信号を抽出する。本発明と一致するデータプロセッサ104の実施形態は、較正動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、分配または中央化された、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、またはハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の較正機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされたデータプロセッサ104の実施形態が本発明の範囲と一致することを認識する。

## 【0022】

本発明と一致するデータプロセッサ104の実施形態は、空気中の波伝搬速度に対する物理探査物質の波伝搬速度の差を補償するために時間アライメントを実行する時間アライメント計算器を含み得る。本発明に一致するGPRシステムによって生成された電磁波は、物理探査物体を光の速度で進む。一般的には、電磁信号は、ホスト媒体における波速度に近い伝搬速度で制御システム電子機器とアンテナとの間に進む。従って、補償されない場合、これは、正確な絶対時間の登録を妨げ得る（すなわち、送信された波が送信アンテナを出る実際の時間を決定する）。さらに、アレイベースのシステムでは、電子回路、各アンテナ対に対して異なり得る。その結果、本発明に一致するデータプロセッサ104の実施形態は、センサユニット102において使用された各アンテナ対ごとに時間アライメントを実行する。さらに、本発明と一致するデータプロセッサ104の実施形態は、以下に詳細に説明されたように波速度を計算する波速度計算器を含み得る。

10

## 【0023】

時間アライメントは、各送信アンテナから各受信アンテナに送信された波が空気を通して進むことを理解することによって達成される。任意のトランスミッタ - レシーバアンテナの対間の距離は公知である。図8では、送信アンテナエレメント802と受信アンテナエレメント804との間の距離が「d」と表示される。空気中の光の速度もまた、 $c_{air} = 3 \times 10^8$  メートル / 秒として公知である。従って、データプロセッサ104は、以下の式を用いて、この空気伝搬の到達時間を計算する。

$$t_{air} = d / c_{air} \quad (1)$$

20

空気中の波速度は、常に物理探査物質内部の光の速度以上であるために、最も速い到達信号は、空気伝搬波に由来する。各トランスミッタ - レシーバ対に対して、データプロセッサ104は、第1の到達ピークに対して取得された時系列（図9）を検索する。図9を参照すると、約12ナノ秒におけるピークは、空気伝搬到達時間であり、約40ナノ秒におけるピークは、地中伝搬到達時間である。次いでデータプロセッサ104は、第1のピークの到達時間が式（1）から決定されたような $t_{air}$ において発生するように獲得された時系列を調整する。

## 【0024】

本発明と一致するGPR装置は、種々のトランスミッタ - レシーバアンテナエレメント対に対して獲得された時系列間の空間的相関を使用する。この進行距離rは、

30

$$r = c_0 t_{arrival} \quad (2)$$

によって進行時間 $t_{arrival}$ に関連付けられる。ここで、 $c_0$ は、ホスト媒体における波速度であり、データプロセッサ104はバックグラウンド波速度 $c_0$ を計算する。

## 【0025】

データプロセッサ104は、空気/地中界面（1006）の直下のトランスミッタ（1002）とレシーバ（1004）との間で速度 $c_0$ で水平に伝搬する臨界的屈折光線（図10、1008）があるという事実を利用することによって $c_0$ を計算する。この地中 - 伝搬到達は、直接空気伝搬到達よりも遅く発生する。これは最も短いグラウンド伝搬光線経路であるので、この到達は、地中物体からの反射に関連付けられた任意の光線経路よりも先である。この概念は図11に示される。図11は、臨界的に屈折された光線経路1108および地中物体1106から反射1110a、1110bに関連付けられた光線経路を示す。臨界的に屈折された光線に対する光線経路1108は、反射1110a、1110bに関連付けられた光線経路よりも短いので、地中伝達光線の到達は、反射よりも先行する。

40

## 【0026】

図12は、波速度を計算するためのバイスタティック測定の概略図である。トランスミッタからレシーバiまでの距離は、 $d_i$ によって表示される。例えば、図12では、 $d_1$ は、送信アンテナ（T）1202と受信アンテナ（ $R_1$ ）1204との間の距離1206であり、 $d_2$ は、送信アンテナ（T）1202と受信アンテナ（ $R_2$ ）1208との間の距離1210であり、そして $d_n$ は、送信アンテナ（T）1202と受信アンテナ（ $R_n$ ）

50

1 2 1 2 との間の距離 1 2 1 4 である。送信 / 受信アンテナの対が上述のようなアレイの代わりに使用される場合、使用された距離がトランスミッタからレシーバ位置までの距離であることに留意すること。

【 0 0 2 7 】

データプロセッサ 1 0 4 は、以下の式を用いてレシーバ  $i$  における臨界的に屈折された光線の到達時間を計算する。

$$t_i = d_i / c_0 \quad (3)$$

以前に記載したように、第 1 の主要な到達は、空気伝搬到達であり、第 2 の主要な到達は、臨界的に屈折された地中伝搬到達である。データプロセッサ 1 0 4 は、 $t_i$  を見出すために、全てのレシーバに対する時系列を検索する。時間アライメントが実行される場合、以下の式を用いて、既知の  $t_i$  および  $d_i$  と共に以下の式を用いて特定の受信アンテナを選択することによって  $c_0$  を直接計算するために、データプロセッサ 1 0 4 は、式 ( 3 ) を使用し得る。

$$c_0 = d_i / t_i \quad (4)$$

あるいは、 $t_i$  および  $d_i$  の全てが使用され得、 $1 / c_0$  は、式 ( 3 ) に対する直線の当てはめの傾きである (例えば最良の直線当てはめ)。

【 0 0 2 8 】

データプロセッサ 1 0 4 が、時間アライメントが実行されなかった場合、同様の手順が空気伝搬到達と地中伝搬到達との間の時間差  $t$  を用いて適用され得る。この場合、適切な関係は、式 ( 3 ) ではなく、以下の式

$$t_i = d_i / c_0 - d_i / c_{air} \quad (5)$$

によって与えられる。

【 0 0 2 9 】

アンテナのアレイを使用する場合、空気および地中伝搬到達の中間の到達が存在する。典型的には、これらは、空気伝搬され、かつアンテナアレイを用いて、または多重反射に関連付けられる。本明細書中では、これらのアーチファクトは、「共鳴 ( r i n g i n g ) 」のことを指し、取得されたデータのパワースペクトルにおけるピークとして明らかになる。波速度を計算する前に、この共鳴を除去する必要がある。これは、スペクトルピークを識別し、任意の上記手順をインプリメントする前に当業者に公知の適切なスペクトルバンドパスフィルタ ( B l a c k m a n - H a r r i s フィルタ等 ) を適用することによってなされ得る。

【 0 0 3 0 】

以下は、単一の送信アンテナおよび 1 つ以上の受信アンテナを用いて構成された G P R システムにおいて本発明と一致する波速度を計算するためのさらなる方法である。ここで、 $i$  番目のレシーバは、送信アンテナから距離  $d_i$  だけ離れている (または 1 つの受信エレメントがアレイをシミュレートするために使用および除去される場合、使用された距離は、トランスミッタからレシーバ位置までの距離である)。トランスミッタがパルス化される場合、任意のレシーバにおける第 1 の 2 つの到達信号は、空気中の波速度  $c_a$  における空気伝搬、および空気中の波速度  $c_g$  (ここで、 $c_g < c_a$ ) における空気 - 地中界面の直下で伝搬する臨界的に屈折された光線を介して送信される。

【 0 0 3 1 】

トランスミッタとレシーバとの間の距離を知ることによって、地中の波速度は、以下の式を用いて計算され得る。

$$c_g = d / t_g \quad (6)$$

ここで、 $d$  は、トランスミッタ - レシーバ分離であり、 $t_g$  は、地中を介して臨界的に屈折された光線の測定された進行時間である。この手順は、例えば、1) 臨界的に屈折された光線に関連付けられた時間の関数としての振幅内のピークは、明瞭に識別され得、そして 2) 取得されたデータにおける時間レジストリが存在する、場合に有用である。無線波に対して、この情報は、波速度とほぼ同じ速度で G P R システム回路を介して進行し、時間レジストリは、 $c_g$  (式 6) において誤差を導入する  $t_g$  における誤差を生じるために

10

20

30

40

50

困難であり得る。時間レジストリ問題は、全体の時系列に対して時間シフトを生成するので、進行時間  $\tau_g$  が影響を受けるが、臨界的に屈折された光線と空気伝搬された光線との間の進行時間の差 ( $\tau_g - \tau_a = \tau_g - \tau_a$ ) は、この誤差によって影響されない。その結果、データプロセッサ 104 は、以下の式を用いて波速度  $c_g$  を計算するためにこの時間差を使用する。

$$d = c_a \tau_a = c_g \tau_g \tag{7}$$

ここで、 $c_a$  および  $d$  は、

【0032】

【数1】

$$c_g = \frac{d}{\tau_{g-a} + \tau_a} \tag{8}$$

10

のように既知である。

【0033】

データ（例えば上記条件2）における実質的なノイズがある場合、時系列内で適切なピークを識別すること決定的に識別することが可能でなく、式（8）の直接的なインプリメンテーションが不可能であり得る。このような場合、 $\tau_g - \tau_a$  は、間接的に決定され得る。 $S_i(t)$  を  $d_i$  のトランスミッタ-レシーバ空間に対する時系列であるとし、 $S_i(t)$  を  $S_i$  の時間的フーリエ変換であると規定する。

20

【0034】

【数2】

$$s_i(\omega) = \int dt e^{i\omega t} S_i(t). \tag{9}$$

$S_i$  の自動相関は以下の形態を有し得る。

30

【0035】

【数3】

$$F_i(t) = \int d\omega e^{-i\omega t} \frac{s_i(\omega) s_i^*(\omega)}{s_i(\omega) s_i^*(\omega) + \epsilon}, \tag{10}$$

ここで、アスタリスクは複素共役を表し、 $\epsilon$  は、特異点 (singularities) を削除し、データ内部のノイズを抑圧する小さいパラメータである。時系列  $F_i$  のプロットは、3つのピークを有し得る。1つは、空気伝搬到達とそれ自体との相関への対応する  $t = 0$  におけるピーク、地中伝搬到達とそれ自体との相関への対応する  $t = 0$  におけるピーク、および空気と地中伝搬ピークとの間の相関に対応する  $\pm(\tau_a - \tau_g)$  におけるピークである。これらのピークは、 $\tau_g - \tau_a$  を決定するために使用され得、次いで式（8）が  $c_g$  を計算するために利用され得る。

40

【0036】

データプロセッサ 104 の実施形態は、送信アンテナから異なる距離において2つの受信アンテナを用いて上記手順の改変をインプリメントし得る。 $S_1$  および  $S_2$  をそれぞれ、 $d_1$  および  $d_2$  のトランスミッタ-レシーバ空間に対する時系列であるとする。

以下の相関関係

50

【 0 0 3 7 】

【 数 4 】

$$F_{1-2}(t) = \int d\omega e^{-i\omega t} \frac{s_1(\omega)s_2^*(\omega)}{s_1(\omega)s_1^*(\omega) + \epsilon}, \quad (11)$$

は、

【 0 0 3 8 】

【 数 5 】

10

$$\tau_a^1 - \tau_a^2, \tau_g^1 - \tau_g^2, \tau_g^1 - \tau_a^2, \text{ および } \tau_a^1 - \tau_g^2,$$

における有意なピークを有し、ここで、

【 0 0 3 9 】

【 数 6 】

20

$$\tau_a^i \text{ および } \tau_g^i$$

はそれぞれ、 $i$  番目のレシーバに対する空気および地中伝搬進行時間である。これらの時間差は、 $c_g$  を計算するために種々の態様でデータプロセッサ 104 によって使用され得る。例えば、差

【 0 0 4 0 】

【 数 7 】

30

$$\tau_g^1 - \tau_g^2; \quad \text{なぜなら} \quad d_1 = c_g \tau_g^1$$

を用いて、データプロセッサ 104 は、以下の式を用いて波速度を計算する。

【 0 0 4 1 】

【 数 8 】

40

$$c_g = \frac{d_1 - d_2}{\tau_g^1 - \tau_g^2}. \quad (12)$$

データプロセッサ 104 によって実行され得る別の較正動作は、GPR システムのためのインパルス応答関数の計算である。地中探査レーダアンテナは、周波数依存の空間的 3 次元ビームパターンを有する。空気中での直接的な伝搬測定によってこれらのビームパターンを特徴付けることが可能である一方で、これらのパターンは、アンテナが空気とは異な

50

る誘電性または電気導電率を有する物質に動的に結び付けられる場合に変化する。本発明の実施形態では、データプロセッサ104は、既知の場所および既知の電磁特性を有する物体上でデータを獲得することによって任意のアレイのジオメトリからアンテナビームパターンを特徴付ける。

【0042】

周波数ドメインでは、トランスミッタ位置  $r_0$  に対するレシーバのアレイ内の所定のポイント  $r$  において取得されたデータは、 $u(r, r_0; k_0)$  と表現され、 $k_0 = \omega / c_0$  は、周波数  $\omega$  におけるバックグラウンド波数である。波のフィールド  $u$  は、 $u_0$  (埋められている物体がない場合に存在する波のフィールド) および  $u'$  (既知の埋められている物体に関連付けられた  $u_0$  に対する摂動) の重ね合せとして考慮され得る。これらの定義によって、摂動された波のフィールドは、

【0043】

【数9】

$$u'(r, r_0; k_0) = - \frac{k_0^2}{4\pi} \int dr' G(r - r'; k_0) u(r' - r_0; k_0) O(r'), \quad (13)$$

ここで、 $G$  は、Green の関数であり、 $O$  は埋められている物体を特徴付ける「物体関数」である。

【0044】

【数10】

$$O(r) = 1 - \frac{k^2(r)}{k_0^2}, \quad (14)$$

$$k_0^2 = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 + i \mu_0 \sigma_0 \omega,$$

$$k^2(r) = \mu_0 \epsilon(r) \omega^2 + i \mu_0 \sigma(r) \omega, \quad (15)$$

この式では、 $\mu_0$  は、自由な空間の透磁率であり、 $\epsilon_0$  および  $\sigma_0$  (  $r$  ) は、それぞれバックグラウンドおよび物体の誘電率であり、 $\epsilon(r)$  および  $\sigma(r)$  は、それぞれバックグラウンドおよび物体電気導電率である。任意の物体が埋められ得るために、比較的小さい物体は、Born 近似が有効であるように選択され得る。この場合、バックグラウンドの波のフィールド  $u_0$  は、

【0045】

【数11】

$$u'(r, r_0; k_0) = - \frac{k_0^2}{4\pi} \int dr' G(r - r'; k_0) u(r' - r_0; k_0) O(r'), \quad (16)$$

を与えるために式(13)において全体のフィールド  $u$  の代わりに使用され得る。

【0046】

式(16)は、転送モデリングのためのデータプロセッサ104によって使用され得る。ここで、所与の  $O$ 、 $u'$  が計算される。あるいは、データプロセッサ104は、逆散乱のためにこの式を使用し得る。ここで、 $O$  は、既知の  $u_0$  および測定された  $u'$  から決定される。ここで、 $u_0$  および  $O$  は既知であり、 $u'$  は、関心のある測定配置のために測定されることが想定され、式(16)は、未知のビームパターンの効果を含むアンテナアレイのインパルス応答関数を決定するためにデータプロセッサ104によって使用される。

【0047】

ポイント(モノポール)レシーバに対して、Green の関数は、Weyl 展開によって

10

20

30

40

50

表現され得る。

【 0 0 4 8 】

【 数 1 2 】

$$G(r; k_0) = i \int \frac{da}{\sqrt{k_0^2 - a^2}} e^{i[a \cdot r + \sqrt{k_0^2 - a^2} |z - r|]} \quad (17)$$

ここで、

【 0 0 4 9 】

【 数 1 3 】

### $\hat{z}$

は、垂直方向における単位ベクトルである。任意の受信アンテナビームパターンに対して、Greenの関数は、以下のように記載され得る。

【 0 0 5 0 】

【 数 1 4 】

$$G(r - r'; k_0) = i \int \frac{da}{\sqrt{k_0^2 - a^2}} A_R(a; k_0) e^{i[a \cdot (r - r') + \sqrt{k_0^2 - a^2} |z - (r - r')|]} \quad (18)$$

ここで、係数  $A_R$  は、未知の受信アンテナビームパターンを表すように含まれる。

【 0 0 5 1 】

同様に、送信アンテナビームパターンは、以下の形態でバックグラウンドフィールド  $u_0$  に導入され得る。

【 0 0 5 2 】

【 数 1 5 】

$$u_0(r' - r_0; k_0) = i \int \frac{d\beta}{\sqrt{k_0^2 - \beta^2}} A_T(\beta; k_0) e^{i[\beta \cdot (r' - r_0) + \sqrt{k_0^2 - \beta^2} |z - (r' - r_0)|]} \quad (19)$$

式 ( 1 8 ) および ( 1 9 ) の式 ( 1 6 ) への代入は、積  $A_R A_T$  を含む  $u'$  と  $O$  との間の複雑な関係を生み出す。十分にバスタティックなジオメトリに対して、水平 2 次元フーリエ変換

【 0 0 5 3 】

【 数 1 6 】

$$\bar{u}'(\kappa, \nu; k_0) = \int dr \int dr_0 u'(r, r_0; k_0) e^{-i(\kappa r - \nu r_0)} \quad (20)$$

は、以下の線形関係を生み出す式 ( 1 6 ) を「逆畳込み ( deconvolve )」を行う。

【 0 0 5 4 】

【 数 1 7 】

$$\bar{u}'(\kappa, \nu; k_0) = \bar{A}(\kappa, \nu; k_0) I(\kappa, \nu; k_0) \bar{O}, \quad (21)$$

ここで

10

20

30

40

50

【 0 0 5 5 】

【 数 1 8 】

 **$\vec{A}$** 

は、 $A_R A_T$  の 2 次元空間フーリエ変換であり、 $I$  は、モノポールソースに対するインパルス応答関数であり、

【 0 0 5 6 】

【 数 1 9 】

10

 **$\vec{O}$** 

は、物体関数の 3 次元空間フーリエ変換である。

【 0 0 5 7 】

従って、データプロセッサ 1 0 4 は、既知の  $O$  および測定された  $u'$  の点でアンテナビームパターンおよびスペクトル応答を含むアレイに対して、以下のインパルス応答関数の空間フーリエ変換を計算するために式 ( 2 1 ) を使用する。

【 0 0 5 8 】

【 数 2 0 】

20

$$\vec{A}(\kappa, \nu; k_0) I(\kappa, \nu; k_0) = \frac{\vec{u}'(\kappa, \nu; k_0)}{\vec{O}}, \quad (22)$$

十分にバスタティックではないアレイは、一方の方向では十分モノスタティックであるかまたはバスタティックであるかのいずれかであり、ならびに他方の方向ではモノスタティックである。従って、これらのジオメトリに対してさらなる仮定または近似が、式 ( 1 6 ) を逆置み込みするためにデータプロセッサ 1 0 4 によって使用され得る。1 つの適切な仮定は、物体が約 1 の波長深さまたはより大きい深さで埋められることである。基準物体の埋められている深さが較正の間制御され得るので、この仮定の有効性が保証され得、式 ( 1 6 ) によって与えられたような有効な関係が発展され得る。従って、上述の解析フレームワークを用いて、データプロセッサ 1 0 4 は、GPR センサからデータに埋められている物体に対応する空間相関を検出する。

30

【 0 0 5 9 】

図 1 の GPR システムの次のエレメントは、プロセッサ 1 0 6 である。本発明に一致するプリプロセッサ 1 0 6 の実施形態は、予め処理する動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化されたハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の予備処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされたプリプロセッサ 1 0 6 の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。

40

【 0 0 6 0 】

プリプロセッサ 1 0 6 は、望まない地中の特徴に関連付けられた取得されたデータにおいてエレメントを拒絶し、および/または関心のあるターゲットのみを認める。例えば、モノスタティックデータの空間周波数予備処理を考慮する。しばしば、土壌または物理探査地層からの反射は、関心のある他の特徴を不明瞭にし得る強い反射を生成する。これらの地層は、典型的にはほぼ平面かつ水平である。水平表面の 2 次元空間フーリエ変換は、空間周波数の原点においてデルタ関数となる。本発明に一致するプリプロセッサ 1 0 6 の実

50



施形態は、DC 応答をフィルタリングするためのノッチフィルタを用いてこのような特徴を除去する。ほとんどの天然の地層は、完全には水平ではなく、真の平面ではないかもしれないので、プリプロセッサ 106 は、ノッチフィルタを低域遮断フィルタ（例えばハイパスフィルタ）に幾分緩和し、これらの地層を実質的に抑制する。Blackman-Harris フィルタは、この目的のために適切なフィルタの例である。同様な空間周波数フィルタは、関心のある特性を許容するために使用され得る。関心のあるターゲットが埋められている公共物である場合、例えば、これらは、むしろ長くかつ薄い独特の特性を有する。このような形状の空間フーリエ変換は、軸方向における DC 応答および横方向における白色応答を生成する。従って、プリプロセッサ 106 は、これらの特性を有する特徴を可能にするために適切なフィルタを適用する。

10

## 【0061】

画像プロセッサ 108 は、データプロセッサ 104 によって処理されたデータから埋められている物体の画像に対応するデータ構造を構築する。画像プロセッサ 108 は、例えば、場所、大きさ、形状、地中フィーチャの材料特性を 2 次元、3 次元で、または 2 次元画像のシーケンスとして再構築し得る。本発明に一致する画像プロセッサ 108 の実施形態は、画像処理動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化された、ハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の画像処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされた画像プロセッサ 108 の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。

20

## 【0062】

画像プロセッサ 108 の実施形態は、以下に限定されないが、合成開口レーダ (SAR)、移動、後方伝搬、回折断層撮影法、代数再構築断層撮影法 (algebraic reconstruction tomography) (ART)、反復 ART、擬似逆時間処理および反転 (reverse) 時間処理を含む画像処理アルゴリズムをインプリメントする。当業者は、他の画像処理アルゴリズムもまた、画像プロセッサ 108 によって実行された機能をインプリメントするのに適することを理解する。さらに、プリプロセッサ 106 によって実行されるいくつかの動作は、フィルタをインパルス応答関数に導入することによって画像プロセッサ 108 のこれらの画像化手順の多くに直接組み込まれ得る。

30

## 【0063】

フィーチャプロセッサ 110 は、検出された埋められている物体の特性に対応する信号において存在するフィーチャを特徴付けるために受信された GPR 信号を処理する。本発明に一致するフィーチャプロセッサ 110 の実施形態は、フィーチャプロセッサ動作をインプリメントするように設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化された、ハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の画像処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされた画像プロセッサ 108 の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。

## 【0064】

フィーチャプロセッサ 110 は、再構築された材料特性における差に基づいたフィーチャを特徴付けるために GPR 信号を区別する。フィーチャプロセッサ 110 の実施形態は、周波数ドメイン処理を使用して、周波数情報を深さにマッピングする逆動作を実行する。フィーチャプロセッサ 110 が、非導電バックグラウンドを介して伝搬された GPR 信号を処理する場合、構築された量は物体関数 (式 14) であり、これは以下の式を有する。

40

## 【0065】

## 【数 21】

$$O(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\varepsilon(\mathbf{x})}{\varepsilon_0} + i \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\omega \varepsilon_0}, \quad (23)$$

式(23)では、 $O$ は複素数であり、その実数部

【0066】

【数22】

$$O_\varepsilon(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\varepsilon(\mathbf{x})}{\varepsilon_0}, \quad (24)$$

10

は、誘電率における空間変動の再構築である。 $O$ の虚数部

【0067】

【数23】

$$O_I(\mathbf{x}) = \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\omega \varepsilon_0}, \quad (25)$$

20

は、明示的に周波数を含む。

【0068】

$L^{-1}$ を、広帯域データを画像にマッピングする動作であるとする。すなわち、

$$O = L^{-1} \{u'\}$$

は、逆動作であり、 $L$ は転送演算子

$$u' = L \{O\}$$

30

である。式(23)を用いて

【0069】

【数24】

$$O_\sigma(\mathbf{x}) = L^{-1} \{\omega L \{\omega O_I\}\}, \quad (26)$$

ここで、

【0070】

【数25】

40

$$O_\sigma(\mathbf{x}) = \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\varepsilon_0}, \quad (27)$$

および画像 $O_\varepsilon$ 、 $O_\sigma$ の対は、誘電および電気導電率の相対空間変動によって画像フィーチャを特徴付ける。当業者は、式23~27が導電バックグラウンドを介して伝搬されるGPR信号の処理に適応するように拡張され得ることを理解する。

【0071】

50

フィーチャプロセッサ 110 は、どのようにして、 $O$  および  $O$  が所定の材料タイプに対して関連付けられるかを理解することによってさらなる差異を達成する。例えば、プラスチック物体は、低誘電率および低導電率によって特徴付けられる。その結果、フィーチャプロセッサ 110 は、プラスチック物体がバックグラウンドよりも大きい（正の） $O$  を示し、概してバックグラウンドよりも小さい（負の） $O$  を示すことを認識する。この逆は、一般的には金属物体に対して真実である。この理由のために、フィーチャプロセッサ 110 は、 $O - O$  を調べることによって金属またはプラスチック物体の画像を形成する改良データセットを生成する。金属物体に対して、この差はかなり負であり得、プラスチック物体に対して、この差はかなり正であり得る。クレ、木、およびコンクリート等の他の物質に対してフィーチャプロセッサ 110 は、和  $O + O$  を用いてフィーチャを向上させる。 10

【0072】

検出器 112 は、関心のあるターゲットを自動的に識別する。本発明と一致する検出器 112 の実施形態は、検出動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化された、ハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の画像処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされた画像プロセッサ 108 の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。

【0073】

検出器 112 は、測量された領域において検出された物体が所定のターゲットに整合するかまたは所定のターゲットクラスに属するかどうかを決定する。測量された領域における物体が整合しない場合、検出器 112 は、物体の場所を識別する。検出器 112 の実施形態は、観測された領域における物体を表す信号とターゲットおよびターゲットクラスとを比較するために整合されたフィルタを使用する。検出器 112 の一実施形態では、整合されたフィルタ  $u(r, \omega)$  を用いるのは、 $\omega$  によって広がった帯域幅にわたって  $r$  によって規定された測定表面にわたって獲得されたデータである。同様に、関心のあるターゲットが点  $x_0$  において集中する場合に、 $v(r, \omega; x_0)$  が獲得されるデータである。このターゲットは、 20

【0074】

【数 26】

$$F_c(x_0) = \sum_{\omega} \int dr u(r, \omega) v(r, \omega; x_0) \quad (28)$$

が閾値を越え、このターゲットの位置が  $F_c$  を最大化する位置  $x_0$  において存在する場合、測定されたデータセットにおいて存在する。

【0075】

多くの他の検出アルゴリズムは、例えば、Bayesian スタティスティックまたは M U S I C アルゴリズム等の、検出器 112 によるインプリメンテーションに適する。 40

【0076】

弁別器 114 は、検出器 112 と同様の信号処理エレメントであるが、弁別器 114 は、獲得された G P R 信号データを直接処理するのではなく、受信された G P R 信号から再構築された画像を処理する。本発明と一致する弁別器 114 の実施形態は、弁別器動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化された、ハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の画像処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされた画像プロセッサ 108 の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。 50

## 【0077】

本発明と一致する弁別への複数のアプローチが存在する。例えば、弁別器114の実施形態は、式(28)と同様の相関動作を実行するが、受信されたGPR信号データから再構築された画像に適応される。弁別器114の他の実施形態は、フィーチャ抽出アルゴリズム、パターン認識アルゴリズム、および/または全体の画像にわたって画像の一部において識別されたフィーチャをトラッキングするフィーチャトラッキングアルゴリズムをインプリメントする。

## 【0078】

ディスプレイ116は、測量された領域を表す視覚フィードバックを用いてGPRシステムのオペレータを検証する。本発明と一致するディスプレイ116の実施形態は、オペレータへの画像を提示し得る(例えば、ビデオスクリーン、プロッタ、プリンタ等)グラフィカルディスプレイデバイス、およびディスプレイ動作をインプリメントするために設計された格納されたコンピュータプログラムコードを実行するプロセッサから構成される。当業者は、ソフトウェア内に全体的に、ハードウェア内に全体に、または分配または中央化された、ハードウェアおよびソフトウェアエレメント間の画像処理機能を割り当てる実施形態においてインプリメントされたディスプレイ116の実施形態が本発明の範囲と一致することを理解する。

10

## 【0079】

ディスプレイ116の実施形態では、オペレータに提示された画像は、測量された場所の三次元レンダリングの形態または再構築の2次元画像のシーケンスを取る。この再構築は、誘電体または複数の性質(反射率等)の複合体、物体関数、あるいはいくつかのステイスタック推定量等の基本的な物質特性であり得る。本発明に一致するディスプレイ116の他の実施形態は、地上表面などの平面上に再構築された情報の投影としてオペレータに画像を提示する。

20

## 【0080】

上記エレメントの各々に対して説明されたGPRシステム関数は、上述されたものとは異なるように分配または組み合わせられ得、そしてこれは本発明の範囲内にある。例えば、GPRシステムは、中央メモリに格納されたソフトウェアを実行する単一のプロセッサまたはプロセッサの群を用いてインプリメントされ得る。ここで、このソフトウェアは、上述のGPRシステム動作の各々に関連する。

30

## 【0081】

上述のようなGPRシステムエレメントの動作は、埋められている物体を迅速かつ正確に探査するために効率的なシステムを提供する。従って、本発明によると、開示されたGPRシステムエレメントは、関心のある領域の急速かつ正確なリアルタイム測量を可能にするポータブルおよびモバイル構造を含む多くのタイプの構造に収容され得る。

## 【0082】

図13は、本発明と一致するGPRシステムを有する可動車両1304の図である。図13に示されるように、レーダアレイ1306はアーム1305に取り付け、アーム1305は、車両1304の後方に取り付ける。レーダアレイ1306は、少なくとも1つの送信アンテナおよび少なくとも1つの受信アンテナを含み得る。車両1304は、矢印1302によって示された方向に移動し得る。レーダアレイ1306は、インパルスを地中1308に送信する。このインパルスは、埋められている物体(地中のパイプ1312等)から反射し得る。レーダアレイ1306は、反射された波形を受信し得る。車両1304の後方のモジュール1314は、図1に対して上記により詳細に説明されたエレメントを含み得る。このエレメントは、アレイ1306を制御し、アレイ1306によって受信された処理信号を制御する。これは、また関心のある測量領域におけるセンサユニット102によって取得されたデータからの埋められている物体の画像をディスプレイ1316上に表示し得る(周囲の領域の画像を用いてまたはこの画像なしで)。

40

## 【0083】

図14は、本発明と一致した、GPRシステムを有するトレーラ1402を有する可動車

50

両 1 4 0 4 の図である。図 1 4 に示された実施形態では、レーダアレイ 1 3 0 6 ( 図 1 4 には示されない ) は、トレーラ 1 4 0 2 内部にあり、このトレーラ 1 4 0 2 は、車両 1 4 0 4 に取り付けられる。トレーラ 1 4 0 2 は、車両 1 4 0 4 を用いて矢印 1 4 1 0 の方向に移動する。図 1 5 は、本発明に一致した、G P R システムを有するポータブルハウジング 1 5 0 4 の図である。図 1 5 に示された実施形態では、レーダアレイ 1 3 0 6 ( 図 1 4 には示されない ) は、ポータブルハウジング 1 5 0 4 内部にある。ユーザ 1 5 0 2 は、ハンドル 1 5 0 6 を用いて、地面 1 3 0 8 上をポータブルハウジング 1 5 0 4 をガイドし得る。ポータブルハウジング 1 5 0 4 は、車輪 1 5 0 8、スキッドパッド ( 図示せず ) を有し得るか、または両方とも有しない。ポータブルハウジング 1 5 0 4 の実施形態はまた、オペレータが全体のシステムを運ぶことを可能にするのに十分軽量に作製され、それにより、歯車、スキッドパッド、または地面上をハウジングを導くための同様な構造の必要性を軽減し得る。図 1 4 のモバイルシステムおよび図 1 5 のポータブルシステムの両方は、関心のある測量された領域におけるセンサユニットによって取得されたデータから埋められている物体の画像も表示し得る ( 周囲のデータの画像を有するかまたはこの画像を有しない ) 。本発明に一致する G P R システムは、多くの掘削の必要性を満たすために誤差のマージン ( margin ) を有する、導電性および非導電性公共物を垂直的にかつ水平的に探査および画像化するためのコスト効率的な方法を提供することによって、ワンコール、個人探査、および S U E の欠点を克服し得る。本発明と一致する G P R システムはまた、将来使用され得る掘削場所の画像の永久的な記録を提供し得る。さらに、本発明と一致する G P R システムは、システムが移動しながら地中画像が形成され得るように、移動車両、トレーラ、またはポータブルハウジング上で適合し得る。

10

20

#### 【 0 0 8 4 】

種々の改変および変更が本発明の精神または範囲から逸脱することなく本発明の開示された実施形態に対してなされ得ることが当業者に明らかである。従って、本発明は、添付の特許請求の範囲およびその均等物内で想起される場合、本発明の改変および変更を網羅することが意図される。

#### 【 図面の簡単な説明 】

#### 【 0 0 8 5 】

【 図 1 】 図 1 は、地中探査レーダを用いて埋められている物体を識別するための装置の実施形態である。

30

【 図 2 】 図 2 は、センサユニット 1 0 2 の詳細な図である。

【 図 3 】 図 3 は、3つの適用可能なアンテナジオメトリのブロック図である。

【 図 4 】 図 4 は、トランスミッタおよびレシーバアンテナエレメントの単一線を有するアンテナアレイ構成 3 0 2 における移動方向を示す。

【 図 5 】 図 5 は、図 4 に示されたアレイ構成およびスキャン方向を用いて3つの異なる時間ステップ  $t_0$ 、 $t_1$ 、および  $t_2$  におけるデータ取得の概略図である。

【 図 6 】 図 6 は、モノスタティックデータ取得のためのセンサユニット 1 0 2 の構成におけるアンテナアレイエレメントの概略図である。

【 図 7 】 図 7 は、マルチスタティックデータ取得の概略図である。

【 図 8 】 図 8 は、伝送アンテナエレメントおよび受信アンテナエレメントの間の隙間の概略図である。

40

【 図 9 】 図 9 は、受信されたレーダ信号の時系列のグラフである。

【 図 1 0 】 図 1 0 は、G P R システムにおける臨界的に屈折された光線の概略図である

【 図 1 1 】 図 1 1 は、臨界的に反射された光線および G P R システムにおいて反射された光線の概略図である。

【 図 1 2 】 図 1 2 は、波速を計算するためのバイスタティック測定の概略図である。

【 図 1 3 】 図 1 3 は、G P R システムを有する移動車両の図である。

【 図 1 4 】 図 1 4 は、G P R システムを有する移動車両の図である。

【 図 1 5 】 図 1 5 は、ポータブル G P R システムの図である。

【 図 1 】

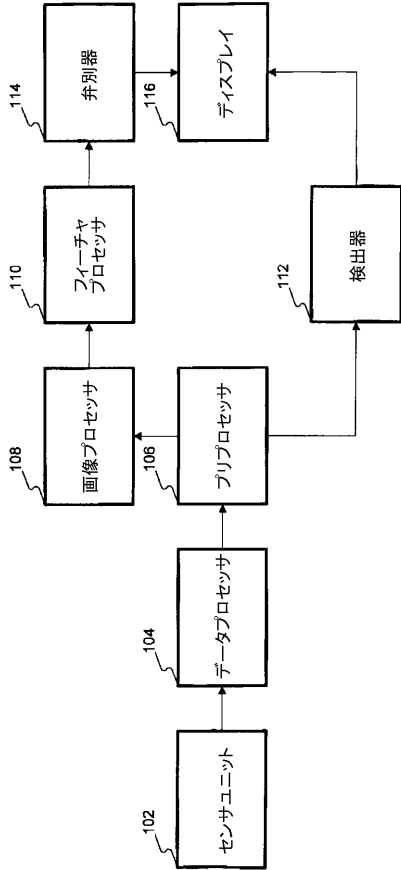


FIG. 1

【 図 2 】

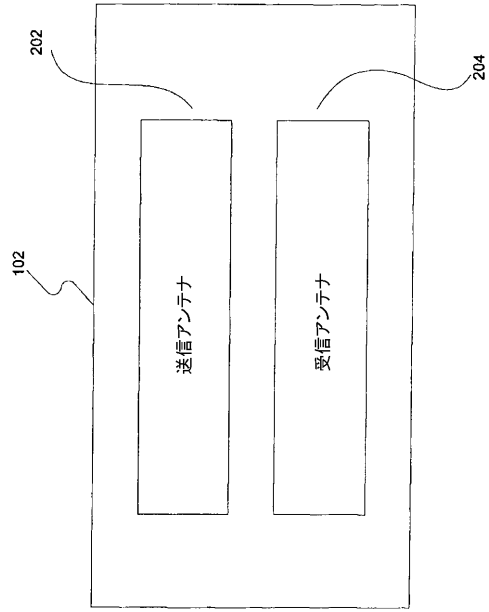
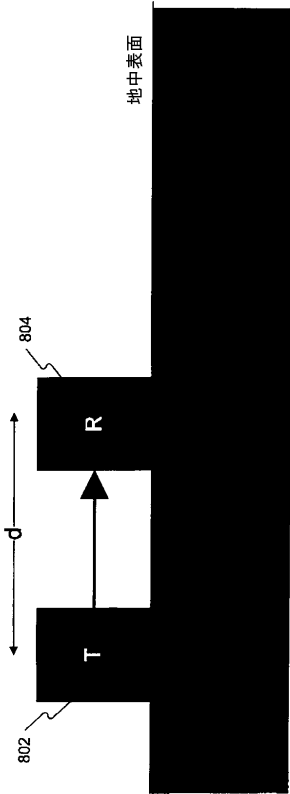
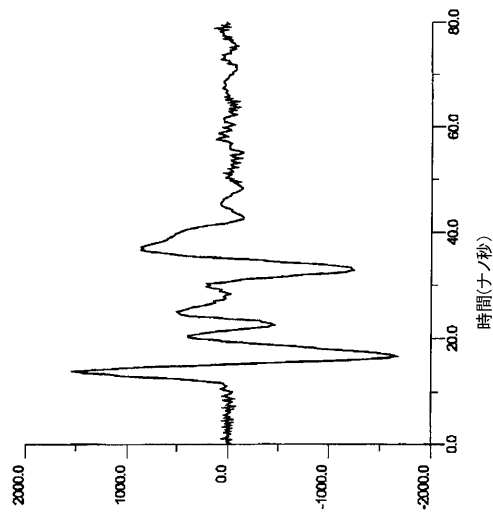


FIG. 2

【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 1 0 】

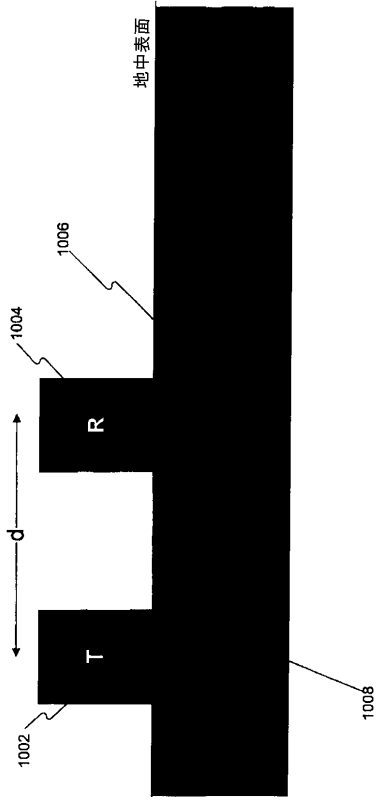


FIG. 10

【 図 1 1 】

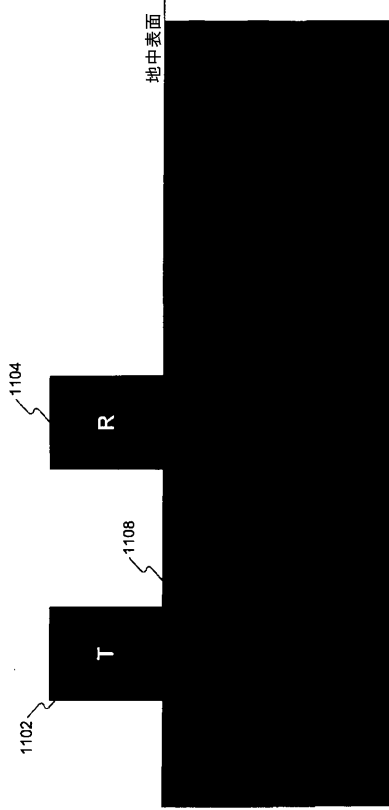


FIG. 11

【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
31 October 2002 (31.10.2002)

PCT

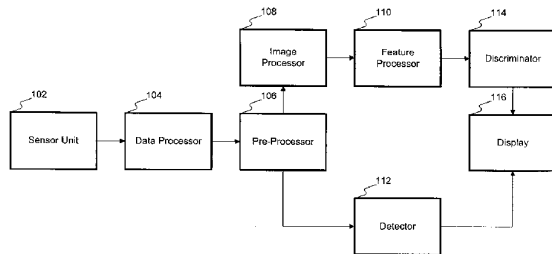
(10) International Publication Number  
WO 02/086542 A2

- (51) International Patent Classification: G01V CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, IIR, IU, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (21) International Application Number: PCT/US0208274
- (22) International Filing Date: 22 April 2002 (22.04.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 60/284,921 20 April 2001 (20.04.2001) US  
UNKNOWN 10 April 2002 (10.04.2002) US
- (71) Applicant and  
(72) Inventor: WITTEN, Alan, J. [ /US]; 3308 River Walk Court, Norman, OK 73072 (US).
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BI, CI, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- (74) Agents: GARRETT, Arthur, S. et al.; Finnegan, Henderson, Farabow, Garrett & Dunner, L.L.P., 1300 I Street, N.W., Washington, DC 20260-3315 (US).
- (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU,

Published: without international search report and to be republished upon receipt of that report

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: A METHOD AND APPARATUS FOR IDENTIFYING BURIED OBJECTS USING GROUND PENETRATING RADAR



(57) Abstract: An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprises a data processor for detecting spatial correlations in data received from a GPR sensor, in the apparatus and an image processor capable of building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor. A method for identifying a buried object using GPR in a system containing a GPR sensor comprising detecting spatial correlations in data received from the GPR sensor in the system and building a data structure corresponding to an image of the buried object from the received data.

WO 02/086542 A2



WO 02/086542

PCT/US02/08274

**A METHOD AND APPARATUS FOR IDENTIFYING BURIED OBJECTS  
USING GROUND PENETRATING RADAR**

**BACKGROUND OF THE INVENTION**

The present invention relates to ground-penetrating radar (GPR) systems and methods, and more particularly to ground-penetrating radar systems and methods for identifying buried objects.

GPR is similar to upward-looking radar used for air traffic control and meteorology, except that the antenna array is directed toward the ground; thus presenting an entirely different set of technical challenges. For example, GPR is used for geophysical applications such as mapping subsurface strata, locating toxic waste sites for remediation, and detecting of unexploded subsurface ordnance.

A GPR system comprises at least one transmitter that transmits an electromagnetic impulse, continuous wave, or swept frequency signal, for example, in the frequency range of 1MHz to 10GHz. The system also comprises at least one receiver that receives a reflected waveform. The impulse is short with respect to the wavelength being transmitted. In practice, the impulse can be, for example, one or two cycles. Therefore, GPR systems are sometimes referred to as "impulse" radars.

Subsurface industries such as construction, utility location, environmental remediation, and unexploded-ordnance detection have long sought safe, reliable, cost-effective methods for "seeing into the ground." The utility location market suffers greatly from inadequate location technologies that result in hundreds of millions of dollars in damages, delays, and lost revenue for utility companies and contractors every year, losses

WO 02/086542

PCT/US02/08274

that can be reduced significantly by use of GPR. Three utility locating market segments, can be distinguished by their accuracy and price: (1) One Call; (2) private locating; and (3) subsurface utility engineering (SUE).

"One Call" is a nationwide clearinghouse that provides an alert to all public and private utilities of when and where construction may impact their lines. By law, contractors must register their site with One Call, which in turn contacts all the relevant utilities so they can mark their utility lines. One Call locating systems are based on electromagnetic induction technology. Utility companies, responding to a One Call work order, guarantee accuracy on conductive lines within twenty-four inches horizontally on either side, with no guarantee of depth. With One Call, utility line locations are simply painted temporarily on the ground, easily subject to erosion or destruction. This poor accuracy results in broken utility lines and revenue loss.

Construction, utility, and industrial companies often rely on "private locating." Private locating provides a greater degree of accuracy than is delivered by One Call. These companies often hire a utility locating company or a geophysics company to apply more expensive and time-consuming locating techniques. Private locating companies typically use electromagnetic induction technology, GPR, and magnetometry. Often this includes excavation, the most reliable and expensive conventional method for determining the exact location of utilities.

Industrial and utility companies, however, frequently require more accurate maps of the subsurface than One Call or private locating can provide. For instance, extra accuracy may be needed while excavating near an oil pipeline because of the rise of

WO 02/086542

PCT/US02/08274

breaking a pipe. Or, it may be too costly to accidentally cut an interstate fiber optic cable carrying important communications. In such situations, excavators perform a total cost/value analysis, including consideration of risk/cost avoidance. Often, they are more willing to pay higher fees to ensure greater accuracy.

"SUE" can provide more accuracy than One Call or private locating. SUE is a rapidly growing specialty service offered by geophysical and engineering companies. It entails planning and designing utility arrangements before highway or other large infrastructure construction. SUE engineers painstakingly map all discernible utilities at a given site using a variety of conventional geophysical methods. SUE uses electromagnetic induction technology, GPR, and magnetometry. It is generally more costly than private locating services because it uses computer aided design to produce a permanent record of the location of utilities. Even this premium service often only identifies 80% of utilities with certainty, frequently less when unknown non-conductive utilities are present. Further, SUE is very expensive. Accordingly, there is, therefore, a need for systems that overcome the limitations of the conventional techniques.

#### **SUMMARY OF THE INVENTION**

The present invention provides a methodology for identifying buried objects using ground penetrating radar. Additional features and advantages of the invention will be set forth in the description which follows, and in part, will be apparent from the description, or may be learned by practicing the invention. The objectives and other advantages of the invention will be realized and obtained by the method and apparatus particularly

WO 02/086542

PCT/US02/08274

pointed out in the written description and the claims hereof as well as in the appended drawings.

To achieve these and other advantages and in accordance with the purpose of the invention, as embodied and broadly described, an apparatus and method according to the invention identifies buried objects using GPR. An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprises a data processor for detecting spatial correlations in data received from a GPR sensor in the apparatus and an image processor capable of building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor. A method for identifying a buried object using GPR in a system containing a GPR sensor comprising detecting spatial correlations in data received from the GPR sensor in the system and building a data structure corresponding to an image of the buried object from the received data.

Both the foregoing general description and the following detailed description are exemplary and explanatory and are intended to provide further explanation of the invention as claimed.

#### **DESCRIPTION OF THE FIGURES**

The accompanying drawings, which are incorporated in and constitute part of the specification, illustrate an embodiment of the invention and together with the general description given above and detailed description of the embodiment given below, serve to explain the principles of the invention.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

Fig. 1 is an embodiment of an apparatus for identifying buried objects using ground-penetrating radar;

Fig. 2 is a detailed view of sensor unit 102;

Fig. 3 is a block diagram of three suitable antenna geometries;

Fig. 4 illustrates a direction of movement in antenna array configuration 302 with a single line of transmitter and receiver antenna elements;

Fig. 5 is a schematic diagram of data acquisition at three different time steps  $t_0$ ,  $t_1$ , and  $t_2$  using the array configuration and scan direction shown in Fig. 4;

Fig. 6 is a schematic diagram of the antenna array elements in a configuration of sensor unit 102 for monostatic data acquisition;

Fig. 7 is a schematic diagram of multistatic data acquisition;

Fig. 8 is a schematic diagram of the distance between a transmitting antenna element and a receiving antenna element;

Fig. 9 is a graph of a received radar signal time series;

Fig. 10 is a schematic of a critically refracted ray in a GPR system;

Fig. 11 is a schematic of a critically refracted ray and a reflected ray in a GPR system;

Fig. 12 is a schematic diagram of bistatic measurements for computing wave speed;

Fig. 13 is a diagram of a mobile vehicle with a GPR system;

Fig. 14 is a diagram of a mobile vehicle with a GPR system; and

Fig. 15 is a diagram of a portable GPR system.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

**DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION**

A method and system is disclosed for identifying buried objects using ground-penetrating radar. Fig. 1 is an embodiment of an apparatus for identifying buried objects using ground-penetrating radar consistent with the present invention. The apparatus of Fig. 1 includes sensor unit 102, data processor 104, pre-processor 106, image processor 108, feature processor 110, detector 112, discriminator 114, and display 116.

Fig. 2 is a detailed view of sensor unit 102. An embodiment of sensor unit 102 consistent with the present invention includes transmit antenna 202 and receive antenna 204. Transmit antenna 202 emits GPR waves used to probe for buried objects. Receive antenna 204 receives the transmitted GPR waves as they are reflected from the ground and from objects located beneath the ground. Sensor unit 102 controls the characteristics of the transmitted GPR signal (in some instances receiving support from data processor 104 as will be described in greater detail below) and receives the reflected signal. Suitable antennas for the present invention include, for example, small broadband antennas with a broad beam pattern having a frequency response spanning at least two octaves.

Those skilled in the art will recognize that there are many suitable geometries for the arrangement of antenna elements in transmit antenna 202 and receive antenna 204. For example, three suitable antenna geometries consistent with the present invention are shown in Fig. 3. Antenna 302 has antenna transmitters ("T") and receivers ("R") arranged in a single line, with alternating transmitter and receiver elements. Antenna 304 has one row of transmitter elements and a parallel row of receiver elements. Antenna 306 has one row of transmitter elements and a parallel row of receiver elements with the receiver

WO 02/086542

PCT/US02/08274

element row offset from the row of transmitter elements. Each antenna can have the same polarization or polarization can vary among the antennas. Additional antenna arrangements consistent with the present invention are described in W.O. 01/18561 A2, published March 15, 2001, entitled "Ground Penetrating Radar Array and Timing Circuit," which is herein incorporated by reference in its entirety.

Although Fig. 3 depicts sensor units comprised of arrays of antenna elements, an embodiment of sensor unit 102 consistent with the present invention includes a pair of transmit and receive antenna elements that are moved during data acquisition to simulate data acquisition using an array. Throughout this application wherever exemplary embodiments are discussed using arrays of antenna elements, one skilled in the art will recognize that such transmit/receive antenna pairs may be used instead of arrays, or in combination with arrays.

To acquire data over a planar surface, for example the ground, the antennas in sensor unit 102 are preferably moved in a direction that is perpendicular to the line formed by the transmit and receive antenna arrays. For example, Fig. 4 illustrates an example of a direction of movement (indicated by the arrow) in antenna array configuration 302 with a single line of transmitter and receiver antenna elements. Fig. 5 is a schematic diagram of data acquisition at three different time steps  $t_0$ ,  $t_1$ , and  $t_2$  (Figs. 5(a), 5(b), and 5(c), respectively) using the array configuration and scan direction shown in Fig. 4. As shown in Fig. 5(a), at time  $t_0$  data are acquired over all antennas in the array at a fixed position  $x_0$ . At time  $t_1$  the antenna array is moved preferably by a fixed amount  $\Delta x$  to position  $x_1$  (Fig. 5(b)). Once at position  $x_1$ , data are acquired over

WO 02/086542

PCT/US02/08274

all antennas in the array at the new position. Figs. 5(b) and 5(c) include shaded antenna array elements showing the locations of the antenna elements at previous time steps. At time  $t_2$  the antenna array is moved again by a fixed amount  $\Delta x$  to position  $x_2$  (Fig. 5(c)). Once at position  $x_2$ , data are acquired over all antennas in the array at the new position. This process continues for a number of iterations sufficient to scan a region of interest over a buried object. Note also that scanning can also be non-linear, e.g.,  $\Delta x$  is not fixed at each time interval.

Data processor 104 can generate control signals that ensure proper operation of sensor unit 102 when acquiring data as illustrated in Figs. 4 and 5. Moreover, data processor 104 processes data received by sensor unit 102. Two techniques for acquiring and processing data using sensor unit 102 and data processor 104 consistent with the present invention are monostatic and multistatic processing. In monostatic data acquisition, data processor 104 assumes that a transmitting and receiving antenna are paired such that the data acquired simulates a single pair of antennas moved in unison. Fig. 6 is a schematic diagram of the antenna array elements in a configuration of sensor unit 102 for monostatic data acquisition. As shown in Fig. 6(a), during period  $t_0$ , sensor unit 102 fires transmit antenna element 602a and then receive antenna element 602b records the reflected GPR signal. During period  $t_1$ , sensor unit 102 activates the next transmit and receive antenna elements 604a and 604b, respectively, in the array (Fig. 6(b)). The remaining transmit and receive antenna elements are activated in pairs at successive time intervals, e.g., transmit element 606a and receive element 606b are activated during period  $t_2$  (Fig. 6(c)), transmit element 608a and receive element 608b



WO 02/086542

PCT/US02/08274

are activated during period t3 (Fig. 6(d)), *etc.* In an alternative embodiment of a monostatic data acquisition consistent with the present invention, a transmitter can be paired with more than one receiver or vice versa. An embodiment of data processor 104 consistent with the present invention includes a monostatic data processor that recognizes the manner in which sensor unit 102 acquires data representing the buried object. The monostatic data processor then processes data accordingly to extract a signal representing the buried object.

Fig. 7 is a schematic diagram of multistatic data acquisition. In multistatic (sometimes also referred to as bistatic) data acquisition mode, data is acquired at all receivers for every transmitter at each time period. In an embodiment of sensor unit 102 consistent with the present invention, during period t0 transmit element 702 fires and each of the receive elements 704-718 record the reflected GPR wave (Fig. 7(a)). During period t1, transmit element 720 fires and each of the receive elements 704-718 record the reflected GPR wave (Fig. 7(b)). During subsequent time periods t2 (Fig 7(e)) and t3 (Fig. 7(d)), transmit elements 722 and 724, respectively, fire and the resultant GPR waves are recorded by receive elements 704-718. This process continues over successive time intervals until data acquisition processor 102 has activated each of the transmit antenna elements. As stated above, note also that this technique of multistatic data acquisition can be performed by moving a pair of antenna elements to simulate data acquisition using an array.

An embodiment of data processor 104 consistent with the present invention includes a multistatic data processor that recognizes the manner in which sensor unit 102

WO 02/086542

PCT/US02/08274

acquires data representing the buried object. The multistatic data processor then processes data accordingly to extract a signal representing the buried object. An embodiment of a multistatic data acquisition processor consistent with the present invention has either a dedicated data acquisition channel for each receiver or a multiplexer for sequentially multiplexing through some lesser number of data acquisition channels.

Among other operations described above, including operations those skilled in the art will recognize are consistent with the present invention, data processor 104 in the apparatus of Fig. 1 performs system calibration operations including, for example, one or more of the following: time alignment, wave speed analysis, and impulse response function computation (which can include, for example, beam pattern and spectral response computations). Each of these operation is described in greater detail below. Generally, data processor 104 processes data received from sensor unit 102 to extract a meaningful signal corresponding to buried object in a surveyed region. An embodiment of data processor 104 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement calibration operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of data processor 104 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating calibration functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

An embodiment of data processor 104 consistent with the present invention can include a time alignment calculator that performs time alignment to compensate for the

WO 02/086542

PCT/US02/08274

difference in wave propagation speed in air versus its propagation speed in geological material. Electromagnetic waves generated by a GPR system consistent with the present invention travel at the speed of light through geological objects. Generally, electromagnetic signals travel between controlling system electronics and the antennas at a propagation speed near that of the wave speed in the host medium. Accordingly, unless compensated for, this can prevent accurate absolute time registration, i.e., determining the actual time at which the transmitted wave leaves the transmitting antenna. Moreover, in an array-based system, electronic circuitry can differ for each antenna pairing. Consequently, an embodiment of data processor 104 consistent with the present invention performs time alignment for each antenna pairing used in sensor unit 102. Moreover an embodiment of data processor 104 consistent with the present invention can include a wave speed calculator to compute wave speed as described in greater detail below.

Time alignment is accomplished by recognizing that the wave sent from each transmitting antenna to each receiving antenna travels through air. The distance between any transmitter-receiver antenna pair is known. In Fig. 8, the distance between transmitting antenna element 802 and receiving antenna element 804 is labeled "d." The speed of light in air is also known:  $c_{air} = 3 \times 10^8$  meters per second. Accordingly, data

WO 02/086542

PCT/US02/08274

processor 104 computes the time of this air propagated arrival using the following equation:

$$t_{air} = \frac{d}{c_{air}}. \quad (1)$$

Because the wave speed in air is always greater than or equal to the speed of light in geological material, the earliest arriving signal will be from the air-propagated wave. For each transmitter-receiver pair, data processor 104 searches an acquired time series (Fig. 9) for the first arriving peak. As seen in Fig. 9, the peak at approximately twelve nanoseconds is the air-propagated arrival time and the peak at approximately forty nanoseconds is the ground-propagated arrival time. Data processor 104 then adjusts the acquired time series so that the arrival time of the first peak occurs at  $t_{air}$  as determined from Eq. (1).

A GPR apparatus consistent with the present invention uses spatial correlations among time series acquired for various transmitter-receiver antenna element pairings.

The travel distance  $r$  is related to the travel time  $t_{arrival}$  by:

$$r = c_0 t_{arrival}, \quad (2)$$

WO 02/086542

PCT/US02/08274

where  $c_0$  is the wave speed in the host medium. Data processor 104 computes the background wave speed  $c_0$ .

Data processor 104 computes  $c_0$  by exploiting the fact that there will be a critically refracted ray (Fig. 10, 1008) that will propagate at speed  $c_0$  horizontally between a transmitter (1002) and receiver (1004) just below the air-ground interface (1006). This ground-propagated arrival will occur later than the direct air-propagated arrival. Since this is the shortest ground-propagated ray path, this arrival will precede any ray paths associated with reflections from subsurface objects. This concept is illustrated in Fig. 11. Fig. 11 shows critically refracted ray path 1108 and ray path associated with a reflection 1110a, 1110b from subsurface object 1106. Since ray path 1108 for the critically refracted ray is shorter than the ray path associated with a reflection 1110a, 1110b, the arrival of the ground-propagated ray will precede that of the reflection.

Fig. 12 is a schematic diagram of bistatic measurements for computing wave speed. The distance from the transmitter to receiver  $i$  is denoted by  $d_i$ . For example, in Fig. 12,  $d_1$  is the distance 1206 between transmitting antenna (T) 1202 and receiving antenna ( $R_1$ ) 1204;  $d_2$  is the distance 1210 between transmitting antenna (T) 1202 and receiving antenna ( $R_2$ ) 1208; and  $d_n$  is the distance 1214 between transmitting antenna (T) 1202 and receiving antenna ( $R_n$ ) 1212. Note also that when a transmit/receive antenna pair is used instead of an array as described above, the distance used is the distance from the transmitter to the receiver position.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

Data processor 104 computes the arrival time for the critically refracted ray at receiver  $i$  using the equation:

$$t_i = \frac{d_i}{c_0}. \quad (3)$$

As previously noted, the first major arrival is the air propagated arrival and the second major arrival is the critically refracted ground propagated arrival. Data processor 104 searches the time series for all receivers to find the  $t_i$ 's. If time alignment has been performed, data processor 104 can use Eq. (3) to compute  $c_0$  directly by selecting a particular receiving antenna and, with  $t_i$  and  $d_i$  known using the following equation:

$$c_0 = \frac{d_i}{t_i}. \quad (4)$$

Alternatively, all  $t_i$ 's and  $d_i$ 's can be used and  $\frac{1}{c_0}$  is the slope of a linear fit for Eq. (3), e.g., the best linear fit.

If data processor 104 has not performed time alignment, a similar procedure can be applied using the time difference  $\Delta t$  between the air and ground propagated arrivals. In this case, the appropriate relationship is given by the equation:

$$\Delta t_i = \frac{d_i}{c_0} - \frac{d_i}{c_{air}} \quad (5)$$

rather than Eq. (3).

WO 02/086542

PCT/US02/08274

When using an array of antennas, there may be arrivals intermediate to the air- and ground-propagated arrivals. These are typically air-propagated and associated with reflections or multiple reflections with the antenna array. These artifacts are referred to herein as "ringing" and will be manifested as peaks in the power spectra of the acquired data. It may be necessary to remove this ringing before computing wave speed. This can be done by identifying the spectral peaks and applying appropriate spectral band-pass filters, such as Blackman-Harris filters, known to those skilled in the art prior to implementing any of the above-described procedures.

The following is an additional method for computing wave speed consistent with the present invention in a GPR system configured with a single transmitting antenna and one or more receiving antennas where the  $i^{\text{th}}$  receiver is a distance  $d_i$  away from the transmitting antenna (or when one receive element is used and moved to simulate an array, the distance used is the distance from the transmitter to the receiver position). If the transmitter is pulsed, the first two arriving signals at any receiver are transmitted through the air propagating at the wave speed in air,  $c_a$ , and a critically refracted ray propagating just below the air-ground interface at a wave speed  $c_g$ , where  $c_g \neq c_a$ .

Knowing the distance between the transmitter and receiver, the wave speed in the ground can be computed using the equation:

$$c_g = \frac{d}{\tau_g}, \quad (6)$$

where  $d$  is the transmitter-receiver separation and  $\tau_g$  is the measured travel time of the critically refracted ray through the ground. This procedure is useful when, for example,

WO 02/086542

PCT/US02/08274

1) the peak in amplitude as a function of time associated with the critically refracted ray can be clearly identified and 2) there is time registry in the acquired data. For radio waves, the information is traveling through the GPR system circuitry at about the same speed as the wave, time registry can be difficult resulting in an error in  $\tau_g$  that will introduce an error in  $c_g$  (Eq. 6). Since a time registry problem produces a time shift to the entire time series, the travel time  $\tau_g$  will be effected; however, the difference in travel time between the critically refracted ray and the air-propagated ray  $\tau_{g-a} = \tau_g - \tau_a$  will not be effected by this error. Consequently, data processor 104 uses this time difference to compute the wave speed  $c_g$  using the equation:

$$d = c_a \tau_a = c_g \tau_g, \quad (7)$$

where  $c_a$  and  $d$  are know so that

$$c_g = \frac{d}{\tau_{g-a} + \tau_a}. \quad (8)$$

When there is substantial noise in the data (e.g., condition 2, above), it may not be possible to definitively identify the appropriate peaks within the time series so that direct implementation of Eq. (8) is impossible. In such cases,  $\tau_{g-a}$  can be determined indirectly. Let  $S_i(t)$  be a time series for a transmitter-receiver spacing of  $d_i$  and define  $s_i(\omega)$  to be the temporal Fourier transform of  $S_i$ ,

$$s_i(\omega) = \int dt e^{i\omega t} S_i(t). \quad (9)$$



WO 02/086542

PCT/US02/08274

An auto-correlation of  $S_i$  can have the form

$$F_i(t) = \int d\omega e^{-i\omega t} \frac{s_i(\omega) s_i^*(\omega)}{s_i(\omega) s_i^*(\omega) + \epsilon}, \quad (10)$$

where the asterisk denotes complex conjugation and  $\epsilon$  is small parameter to eliminate singularities and suppress noise in the data. A plot of the time series  $F_i$  can have three peaks; one at  $t = 0$  corresponding to the correlation of the air propagated arrival with itself and the ground propagated arrival with itself; as well as peaks at  $\pm (\tau_a - \tau_g)$  corresponding to the correlations between air and ground propagated peaks. These peaks can be used to determine  $\tau_{g,a}$  and Eq. (8) can then be employed to compute  $c_g$ .

An embodiment of data processor 104 can implement a variation of the above procedure using two receiving antennas at different distances from the transmitting antenna. Let  $S_1$  and  $S_2$  be time series for transmitter-receiver spacings of  $d_1$  and  $d_2$ , respectively. A cross-correlation of the form

$$F_{1-2}(t) = \int d\omega e^{-i\omega t} \frac{s_1(\omega) s_2^*(\omega)}{s_1(\omega) s_1^*(\omega) + \epsilon}, \quad (11)$$

will have significant peaks at  $\tau_a^1 - \tau_a^2, \tau_g^1 - \tau_g^2, \tau_a^1 - \tau_g^2$ , and  $\tau_g^1 - \tau_a^2$ , where  $\tau_a^i$  and

$\tau_g^i$  are

the air and ground propagated travel times, respectively, for the  $i^{\text{th}}$  receiver. These time

WO 02/086542

PCT/US02/08274

differences can be used by data processor 104 in various ways to compute  $c_g$ . For example, using the difference  $\tau_g^1 - \tau_g^2$ ; because  $d_1 = c_g \tau_g^1$  and, data processor 104 computes the wave speed using the following equation:

$$c_g = \frac{d_1 - d_2}{\tau_g^1 - \tau_g^2}. \quad (12)$$

Another calibration operation that can be performed by data processor 104 is the computation of an impulse response function for the GPR system. Ground penetrating radar antennas have spatially three-dimensional beam patterns that are frequency dependent. While it is possible to characterize these beam patterns by direct propagation measurements in air, these patterns will change when the antennas are dynamically coupled to a material with a dielectric or electrical conductivity that is different from air. In an embodiment of the present invention, data processor 104 characterizes antenna beam patterns from any array geometry by acquiring data over an object having a known location and known electromagnetic properties.

In the frequency domain, the acquired data at some point  $\mathbf{r}$  in the array of receivers for a transmitter position  $\mathbf{r}_0$  is expressed as  $u(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0; k_0)$  where  $k_0 = \omega/c_0$  is the background wavenumber at frequency  $\omega$ . The wave field  $u$  can be considered as the superposition of  $u_0$ , the wavefield that would exist in the absence of a buried object and  $u'$ , the perturbation to  $u_0$  associated with the known buried object. With these definitions, the perturbed wave field is:

WO 02/086542

PCT/US02/08274

$$u'(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0; k_0) = -\frac{k_0^2}{4\pi} \int d\mathbf{r}' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}'; k_0) u(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0; k_0) O(\mathbf{r}'), \quad (13)$$

where  $G$  is the Green's function and  $O$  is the "object function" that characterizes the buried object:

$$O(\mathbf{r}) = 1 - \frac{k^2(\mathbf{r})}{k_0^2}, \quad (14)$$

$$k_0^2 = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 + i\mu_0 \sigma_0 \omega,$$

$$k^2(\mathbf{r}) = \mu_0 \epsilon(\mathbf{r}) \omega^2 + i\mu_0 \sigma(\mathbf{r}) \omega, \quad (15)$$

In this equation:  $\mu_0$  is the free-space magnetic permeability,  $\epsilon_0$  and  $\epsilon(\mathbf{r})$  are background and object dielectric constants, respectively; and  $\sigma_0$  and  $\sigma(\mathbf{r})$  are the background and object electrical conductivities, respectively. Since any object can be buried, a relatively small object can be selected such that the Born approximation is valid, in which case, the background wave field  $u_0$  can be used in place of the total field  $u$  in Eq. (13) to give

$$u'(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0; k_0) = -\frac{k_0^2}{4\pi} \int d\mathbf{r}' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}'; k_0) u_0(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0; k_0) O(\mathbf{r}'). \quad (16)$$

Equation (16) can be used by data processor 104 for forwarding modeling where, given  $O$ ,  $u'$  is computed. Alternatively, data processor 104 can use this equation for inverse scattering where  $O$  is determined from known  $u_0$  and measured  $u'$ . Here, it is assumed that  $u_0$  and  $O$  are known,  $u'$  is measured for a measurement configuration of interest, and Eq. (16) is used by data processor 104 to determine the impulse response

WO 02/086542

PCT/US02/08274

function of the antenna array that includes the effects of the unknown beam pattern.

For point (monopole) receivers, the Green's function can be represented by the Weyl expansion

$$G(\mathbf{r}; k_0) = i \int \frac{d\alpha}{\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{i[\alpha \mathbf{r} + \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} \hat{\mathbf{z}} \cdot \mathbf{r}]} \quad (17)$$

where  $\hat{\mathbf{z}}$  is a unit vector in the vertical direction. For any arbitrary receiving antenna beam pattern, the Green's function can be written as

$$G(\mathbf{r} - \mathbf{r}'; k_0) = i \int \frac{d\alpha}{\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} A_R(\alpha; k_0) e^{i[\alpha(\mathbf{r} - \mathbf{r}') + \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} \hat{\mathbf{z}} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] } \quad (18)$$

where the factor  $A_R$  is included to represent the unknown receiving antenna beam pattern.

Similarly, the transmitting antenna beam pattern can be introduced into the background field  $u_0$  in the form

$$u_0(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0; k_0) = i \int \frac{d\beta}{\sqrt{k_0^2 - \beta^2}} A_T(\beta; k_0) e^{i[\beta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0) + \sqrt{k_0^2 - \beta^2} \hat{\mathbf{z}} \cdot (\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)] } \quad (19)$$

Substitution of Eqs. (18) and (19) into Eq. (16) yields a complicated relationship between  $u'$  and  $O$  involving the product  $A_R A_T$ . For a fully bistatic geometry, the horizontal two-dimensional Fourier transform

$$\bar{u}'(\boldsymbol{\kappa}, v; k_0) = \int d\mathbf{r} \int d\mathbf{r}_0 u'(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0; k_0) e^{-i(\boldsymbol{\kappa} \cdot \mathbf{r} - v \cdot \mathbf{r}_0)} \quad (20)$$

WO 02/086542

PCT/US02/08274

will "deconvolve" Eq. (16) yielding the linear relationship

$$\tilde{u}'(\kappa, \nu; k_0) = \tilde{A}(\kappa, \nu; k_0)I(\kappa, \nu; k_0)\tilde{O}, \quad (21)$$

where  $\tilde{A}$  is the two-dimensional spatial Fourier transform of  $A_r A_t$ ,  $I$  is the impulse response function for monopole sources, and  $\tilde{O}$  is the three-dimensional spatial Fourier transform of the object function.

Accordingly, data processor 104 uses Eq. (21) to compute the spatial Fourier transform of the impulse response function:

$$\tilde{A}(\kappa, \nu; k_0)I(\kappa, \nu; k_0) = \frac{\tilde{u}'(\kappa, \nu; k_0)}{\tilde{O}}, \quad (22)$$

for the array including the antenna beam patterns and spectral responses in terms of the known  $O$  and measured  $u'$ .

Arrays that are not fully bistatic are either fully monostatic or bistatic in one direction and monostatic in the other. Accordingly, for these geometries, additional assumptions or approximations can be used by data processor 104 for deconvolving Eq. (16). One suitable assumption is that the object is buried about one wavelength deep or deeper. Since the burial depth of the reference object can be controlled during calibration, the validity of this assumption can be assured and a valid relationship such as that given by Eq. (16) can be developed. Thus, using the analytical framework described above, data processor 104 detects spatial correlations corresponding to the buried object in data from the GPR sensors.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

The next element of the GPR systems of Fig. 1 is preprocessor 106. An embodiment of preprocessor 106 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement preprocessing operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of preprocessor 106 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating preprocessing functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

Preprocessor 106 rejects elements in the acquired data associated with unwanted subsurface features and/or admits only targets of interest. For example, consider spatial frequency preprocessing of monostatic data. Frequently reflections from soil or geological strata produce strong reflections that can obscure other features of interest. These strata typically are nearly planar and horizontal. The two-dimensional spatial Fourier transform of a horizontal surface will be a delta function at the spatial frequency origin. An embodiment of preprocessor 106 consistent with the present invention removes such a feature using a notch filter for filtering a DC response. Since most naturally occurring strata are not perfectly horizontal, and may not be truly planar, preprocessor 106 relaxes the notched filter somewhat into a low-cut filter (e.g., "high-pass filter") to substantially suppress these strata. A Blackman-Harris filter is an example of an appropriate filter for this purpose. Similar spatial frequency filters can be used to admit features of interest. If targets of interest are buried utilities, for example, these have the rather unique characteristic of being long and thin. The spatial Fourier transform of such a shape will generate a DC response in the axial direction and a white

WO 02/086542

PCT/US02/08274

response in the transverse direction. Thus, preprocessor 106 applies an appropriate filter to admit features having these characteristics.

Image processor 108 builds a data structure corresponding to an image of the buried object from the data processed by data processor 104. Image processor 108 can, for example, reconstruct the location, size, shape, and material properties of subsurface features in two-dimensions, three-dimensions, or as a sequence of two-dimensional images. An embodiment of image processor 108 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement image processing operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of image processor 108 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating image processing functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

Embodiments of image processor 108 implement image processing algorithms including, but not limited to, synthetic aperture radar (SAR), migration, backpropagation, diffraction tomography, algebraic reconstruction tomography (ART), iterative ART, pseudo-inverse, and reverse time processing. One skilled in the art will recognize that other image processing algorithms are also suitable for implementing the functions performed by image processor 108. Moreover, some operations performed by preprocessor 106 can be incorporated directly into many of these imaging procedures of image processor 108 by introducing filters into the impulse response function.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

Feature processor 110 processes a received GPR signal to characterize features present in the signal that correspond to properties of a detected buried object. An embodiment of feature processor 110 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement feature processor operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of feature processor 110 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating feature processor functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

Feature processor 110 differentiates the GPR signal to characterize features based on differences in reconstructed material properties. An embodiment of feature processor 110 uses frequency domain processing, performing an inverse operation mapping frequency information to depth. When feature processor 110 processes a GPR signal that propagated through a non-conducting background, the reconstructed quantity is the object function, Eq. (14), which has the form

$$O(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\epsilon(\mathbf{x})}{\epsilon_0} + i \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\omega\epsilon_0}. \quad (23)$$

In Eq. (23),  $O$  is complex and its real part,

$$O_r(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\epsilon(\mathbf{x})}{\epsilon_0}, \quad (24)$$



WO 02/086542

PCT/US02/08274

is a reconstruction of the spatial variations in dielectric constant. The imaginary part of  $O$ ,

$$O_i(\mathbf{x}) = \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\omega\epsilon_0}, \quad (25)$$

explicitly involves the frequency.

Let  $L^{-1}$  be the operator that maps the broadband data into the image, i.e.,

$$O = L^{-1}\{u\}$$

is the inverse operator, so that  $L$  is the forward operator,

$$u' = L\{O\}.$$

Using Eq. (23):

$$O_s(\mathbf{x}) = L^{-1}\{\omega L\{\omega O_s\}\}, \quad (26)$$

where

$$O_s(\mathbf{x}) = \frac{\sigma(\mathbf{x})}{\epsilon_0}, \quad (27)$$

and the pair of images  $O_s, O_e$  characterize imaged features by their relative spatial

WO 02/086542

PCT/US02/08274

variations in dielectric and electrical conductivity. Those skilled in the art will recognize that equations 23-27 can be extended to accommodate processing a GPR signal that propagated through a conducting background.

Feature processor 110 accomplishes further differentiation by recognizing how  $O_e$  and  $O_p$  are related for certain material types. For example, plastic objects are characterized by low dielectric and low conductivity. Consequently, feature processor 110 recognizes that plastic objects exhibit an  $O_e$  that is greater than background (positive) and an  $O_p$  that is, in general, less than background (negative). The converse is generally true for metal objects. For this reason, feature processor 110 generates an enhanced data set forming a picture of metal or plastic objects by examining  $O_e - O_p$ . For metal objects, this difference could be strongly negative while, for plastic objects, it could be strongly positive. For other materials such as clay, wood, and concrete; feature processor 110 enhances features using the sum  $O_e + O_p$ .

Detector 112 automatically identifies targets of interest. An embodiment of detector 112 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement detection operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of detector 112 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating detection functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

Detector 112 determines whether an object detected in a surveyed region matches a predetermined target or belongs to a predefined target class. If the object in the

WO 02/086542

PCT/US02/08274

surveyed region does match, detector 112 identifies the location of the object. An embodiment of detector 112 uses matched filters to compare a signal representing an object in a surveyed region to targets and target classes. In one embodiment of detector 112 using matched filters  $u(\mathbf{r}, \omega)$  is the acquired data over a measurement surface defined by  $\mathbf{r}$  over a bandwidth spanned by  $\omega$ . Similarly,  $v(\mathbf{r}, \omega; \mathbf{x}_0)$  is the data that would be acquired if the target of interest were centered at the point  $\mathbf{x}_0$ . This target is present in the measured data set if

$$F_s(\mathbf{x}_0) = \sum_{\omega} \int d\mathbf{r} u(\mathbf{r}, \omega) v(\mathbf{r}, \omega; \mathbf{x}_0) \quad (28)$$

exceeds a threshold and the location of this target will be at the position  $\mathbf{x}_0$  that maximizes  $F_s$ .

Many other detection algorithms are suitable for implementation by detector 112 such, for example, Bayesian statistics or the MUSIC algorithm.

Discriminator 114 is a signal processing element similar to detector 112 (described in detail above); however, discriminator 114 processes images reconstructed from received GPR signal data rather than processing the acquired GPR signal data directly. An embodiment of discriminator 114 consistent with the present invention is comprised of a processor that executes stored computer program code designed to implement discriminator operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of discriminator 114 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating discriminator functions among hardware and software

WO 02/086542

PCT/US02/08274

elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

There are a number of approaches to discrimination consistent with the present invention. For example, an embodiment of discriminator 114 performs a correlation operation similar to Eq. (28), but applied to images reconstructed from received GPR signal data. Other embodiments of discriminator 114 implement feature extraction algorithms, pattern recognition algorithms, and/or feature tracking algorithms that track a feature identified in one portion of the image throughout the entire image.

Display 116 proves an operator of the GPR system with visual feedback representing the surveyed region. An embodiment of display 116 consistent with the present invention is comprised of a graphical display device that can present an image to an operator (e.g., video screen, plotter, printer, etc.) and a processor that executes stored computer program code designed to implement display operations. One skilled in the art will recognize that an embodiment of display 116 implemented entirely in software, entirely in hardware, or in an embodiment allocating display functions among hardware and software elements, either distributed or centralized, is consistent with the scope of the present invention.

In an embodiment of display 116, the image presented to the operator takes the form of a three-dimensional rendering of the surveyed site or a sequence of two-dimensional images of the reconstruction. The reconstructions can be of a basic material property, such as dielectric, or a composite of multiple properties, such as reflectivity, object function or some statistical estimator. Other embodiments of display 116

WO 02/086542

PCT/US02/08274

consistent with the present invention present images to the operator as projections of reconstructed information onto a plane such as the ground surface.

The GPR system functions described for each of the elements above can be distributed or combined differently than stated above and still fall within the scope of the invention. For example, the GPR system can be implemented using a single processor or group of processors that execute software stored in a central memory, wherein the software relates to each of the above-described GPR system operations.

The operation of the GPR system elements as defined above provide an efficient system to rapidly and accurately locate buried objects. Therefore, in accordance with the present invention, the disclosed GPR system elements can be housed in many types of structures, including portable and mobile structures to allow rapid and accurate real-time surveying of a region of interest.

Fig. 13 is a diagram of a mobile vehicle 1304 with a GPR system, consistent with this invention. A radar array 1306 attaches to an arm 1305, which attaches to the back of a vehicle 1304, as shown in Fig. 13. Radar array 1306 may comprise at least one transmit antenna and at least one receive antenna. Vehicle 1304 may move in direction shown by arrow 1302. Radar array 1306 transmits impulses into ground 1308. The impulses may reflect off of a buried object, such as subterranean pipe 1312 and radar array 1306 may receive reflected waveforms. Module 1314 on the back of vehicle 1304 may comprise elements described in greater detail above for Fig. 1, which control array 1306 and process signals received by array 1306. It may also display on display 1316 images of

WO 02/086542

PCT/US02/08274

buried objects from data acquired by sensor unit 102 in the surveyed region of interest (with or without images of the surrounding area).

Fig. 14 is a diagram, consistent with this invention, of mobile vehicle 1404 with a trailer 1402 having a GPR system. In the embodiment shown in Fig. 14, radar array 1306 (not shown in Fig. 14) is within trailer 1402, which is attached to vehicle 1404. Trailer 1402 moves in the direction of arrow 1410 with vehicle 1404. Fig. 15 is a diagram, consistent with this invention, of a portable housing 1504 with a GPR system. In the embodiment shown in Fig. 15, radar array 1306 (not shown in Fig. 14) is within portable housing 1504. A user 1502 may guide portable housing 1504 over ground 1308 using handle 1506. Portable housing 1504 may have wheels 1508, skid pads (not shown), or neither. An embodiment of portable housing 1504 can also be made sufficiently light to allow an operator to carry the entire system, thereby alleviating the need for wheels, skid pads, or similar structure to guide the housing over the ground. Both the mobile system of Fig. 14 and the portable system of Fig. 15 may also display images of buried objects from data acquired by the sensor unit in the surveyed region of interest (with or without images of the surrounding area). A GPR system consistent with the present invention can overcome the disadvantages of One Call, private locating, and SUE by providing a cost effective method to locate and image conductive and non-conductive utilities, vertically and horizontally, with a margin of error to satisfy many excavating needs. A GPR system consistent with the present invention can also provide a permanent record of images of the excavation site that can be used in the future. Further, a GPR system consistent with the present invention can fit onto a moving

WO 02/086542

PCT/US02/08274

vehicle, trailer, or portable housing so that subsurface images can be formed as the system is moving.

It will be apparent to those skilled in the art that various modifications and variations can be made to the disclosed embodiments of the present invention without departing from the spirit or scope of the invention. Thus it is intended that the present invention cover the modifications and variations of this invention provided they come within the scope of the appended claims and their equivalents.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

I claim:

1. An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprising:
  - a data processor comprising
    - means for detecting spatial correlations corresponding to the buried object in data received from the at least one GPR sensor, and
    - a wave speed calculator;
    - an image processor for building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor using the means for detecting and the wave speed calculator; and
    - a discriminator for identifying the buried object from data in the data structure.
2. The apparatus of claim 1, wherein the data processor further comprises:
  - a monostatic data processor.
3. The apparatus of claim 1, wherein the data processor further comprises:
  - a multistatic data processor.
4. The apparatus of claim 1, wherein the data processor comprises:
  - a time alignment calculator.
5. The apparatus of claim 1, wherein the data processor comprises:
  - an impulse response function calculator.
6. The apparatus of claim 1, further comprising:
  - a preprocessor capable of at least one of eliminating an unwanted object from the received data or admitting a target of interest in the received data.



WO 02/086542

PCT/US02/08274

7. The apparatus of claim 1, further comprising:  
a detector capable of identifying the buried object.
8. The apparatus of claim 1, further comprising:  
a data link to an information management system.
9. The apparatus of claim 1, further comprising:  
a display for displaying the image of the buried object.
10. The apparatus of claim 1, further comprising:  
a display that projects an image representing the buried object on the ground.
11. An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) containing at least one GPR sensor, comprising:  
a data processor for processing data collected from the at least one GPR sensor to extract at least one identifiable feature of the buried object from the data; and  
a detector capable of identifying the buried object from the at least one identifiable feature.
12. The apparatus of claim 11, wherein the detector further comprises:  
a depth indicator for directing the detector to a specified depth range.
13. The apparatus of claim 11, wherein the detector further comprises:  
a refractive index indicator for directing the detector to an object within a specified refractive index range.

WO 02/086542

PCT/US02/08274

14. A mobile system for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) containing at least one GPR sensor, comprising:
- a mobile housing for moving the mobile system along terrain under which the object is buried;
  - a data processor mounted in the mobile housing comprising
    - means for detecting spatial correlations corresponding to the buried object in datareceived from the at least one GPR sensor, and
  - a wave speed calculator;
  - an image processor mounted in the mobile housing for building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor using the means for detecting and the wave speed calculator; and
  - a descriptor mounted in the mobile housing for identifying the buried object from data in the data structure.
15. The mobile system of claim 14, wherein the data processor further comprises:
- at least one of a monostatic or multistatic data processor.
16. The mobile system of claim 14, further comprising:
- a display for displaying the image of the buried object.
17. A portable system for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) containing at least one GPR sensor, comprising:
- a housing suitable for being hand-held by an operator;
  - a data processor mounted in the housing comprising

WO 02/086542

PCT/US02/08274

means for detecting spatial correlations corresponding to the buried object in data received from the at least one GPR sensor, and

a wave speed calculator;

an image processor mounted in the housing for building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor using the means for detecting and the wave speed calculator; and

a discriminator mounted in the housing for identifying the buried object from data in the data structure.

18. The portable system of claim 17, wherein the data processor further comprises: at least one of a monostatic or multistatic data processor.

19. The portable system of claim 17, further comprising: a display for displaying the image of the buried object.

20. A method for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprising:

detecting spatial correlations corresponding to the buried object in data received from the at least one GPR sensor;

computing a wave speed associated with the received data;

building a data structure corresponding to an image of the buried object from the received data; and

identifying the buried object from the data in the data structure.

21. The method of claim 20, wherein the step of detecting spatial correlations further comprises the substep of:

WO 02/086542

PCT/US02/08274

processing the received data using at least one of a monostatic or multistatic data processor.

22. The method of claim 20, wherein the step of detecting spatial correlations further comprises the substep of:

computing an impulse response.

23. The method of claim 20, further comprising:

time aligning the received data.

24. The method of claim 20, further comprising:

performing at least one of eliminating an unwanted object from the received data or admitting a target of interest in the received data.

25. The method of claim 20, further comprising:

displaying the image of the buried object.

26. The method of claim 20, further comprising:

projecting the image of the buried object on the ground.

27. An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprising:

means for data processing comprising

means for detecting spatial correlations corresponding to the buried object

in data received from the at least one GPR sensor, and

means for calculating wave speed;

WO 02/086542

PCT/US02/08274

means for building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the means for data processing using the means for detecting and the means for calculating wave speed; and

means for identifying the buried object from data in the data structure.

28. A computer program product for use in a computer adapted for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR), the computer program product comprising a computer readable medium for storing computer readable code means, which when executed by a the computer, enables the computer to identify a buried object, and wherein the computer readable code means includes computer readable instructions for causing the computer to execute a method comprising:

detecting spatial correlations corresponding to the buried object in data received from the at least one GPR sensor;

computing a wave speed associated with the received data;

building a data structure corresponding to an image of the buried object from the received data; and

identifying the buried object from the data in the data structure.

29. The computer program product of claim 28, wherein the computer readable code means further includes computer readable instructions for causing the computer to execute the step of:

processing the received data using at least one of a monostatic or multistatic data processor.

30. The computer program product of claim 29, wherein the computer readable code

WO 02/086542

PCT/US02/08274

means further includes computer readable instructions for causing the computer to execute the step of:

time aligning the received data.

31. A data processor in a ground penetrating radar (GPR) system for identifying a buried object:

a time alignment calculator; and

a wave speed calculator.

32. A method for processing data in a ground penetrating radar (GPR) system for identifying a buried object:

time aligning data received from at least one GPR sensor; and

calculating a wave speed associated with the time aligned data.

33. A computer program product for use in a computer adapted for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR), the computer program product comprising a computer readable medium for storing computer readable code means, which when executed by a the computer, enables the computer to identify a buried object, and wherein the computer readable code means includes computer readable instructions for causing the computer to execute a method comprising:

time aligning data received from at least one GPR sensor; and

calculating a wave speed associated with the time aligned data.

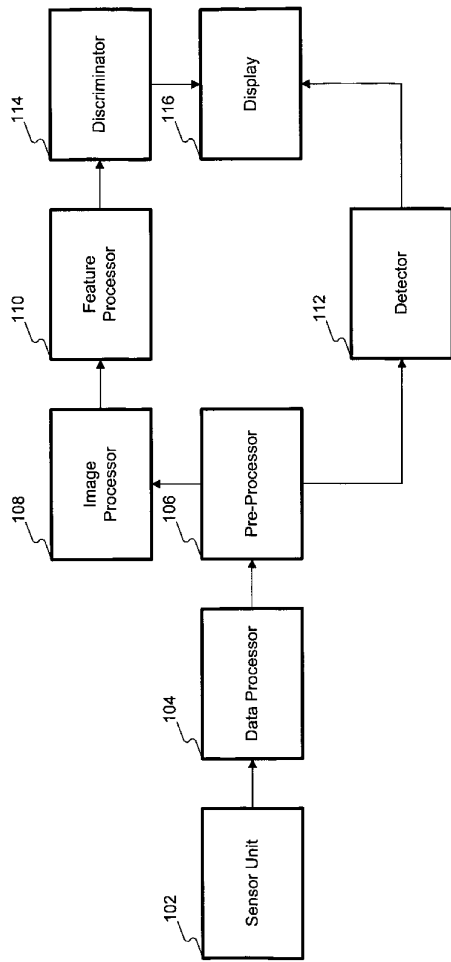


FIG. 1

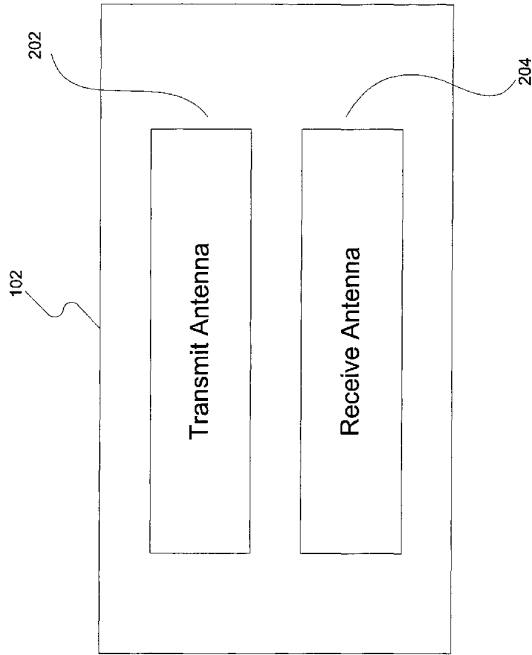


FIG. 2



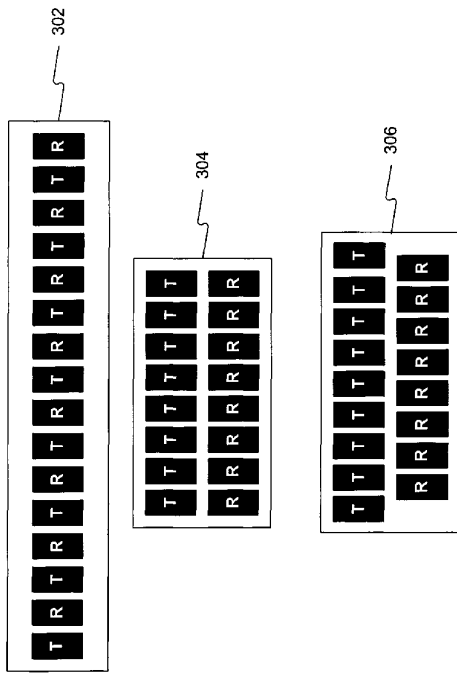


FIG. 3

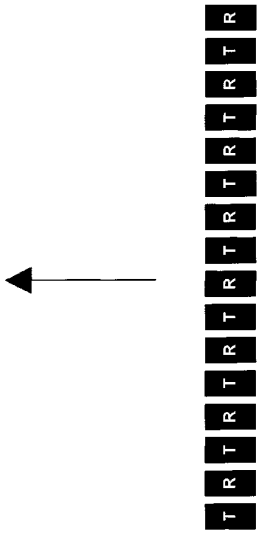


FIG. 4

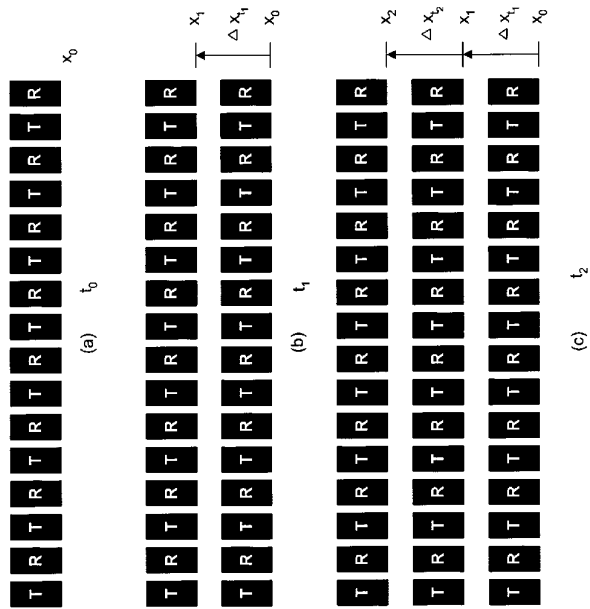


FIG. 5

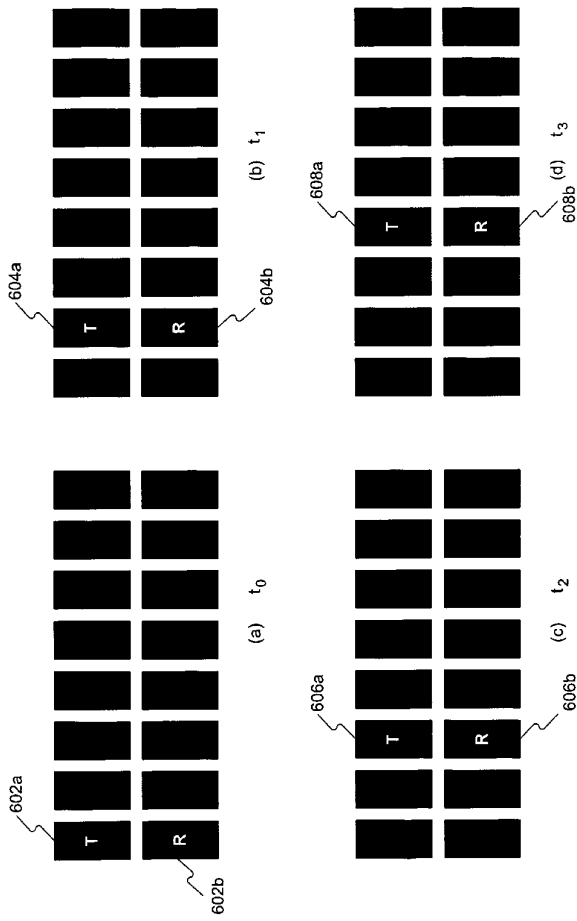


FIG. 6

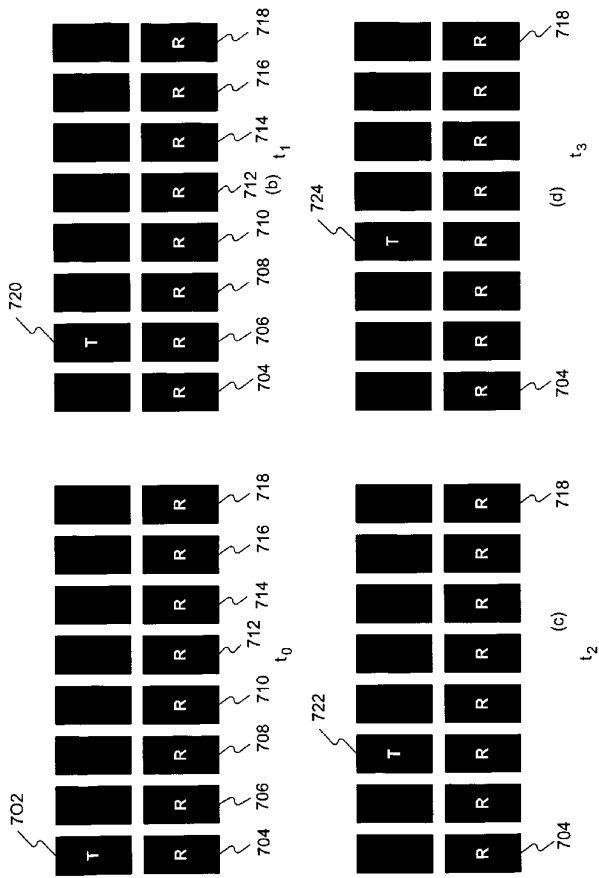


FIG. 7

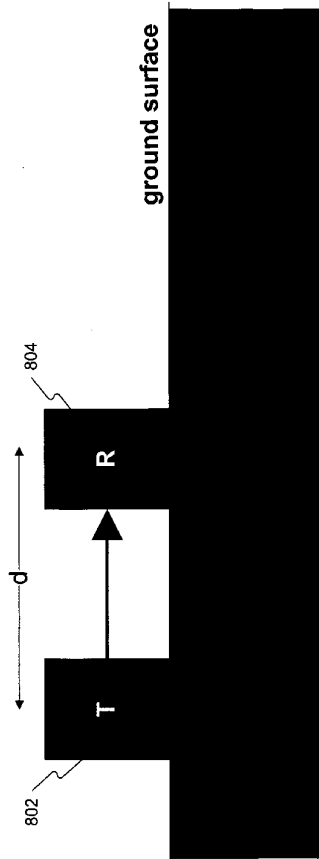


FIG. 8

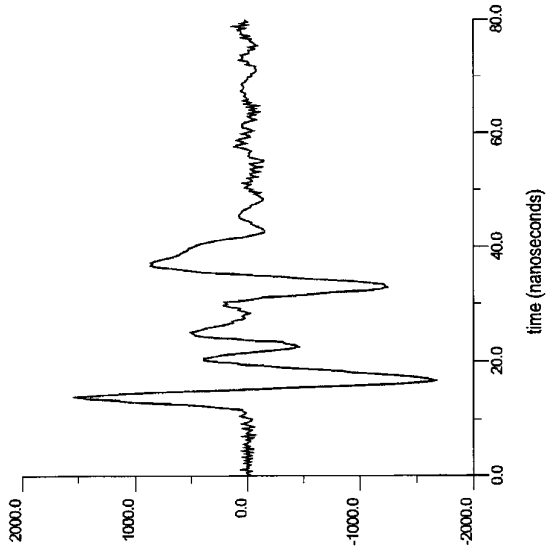


FIG. 9

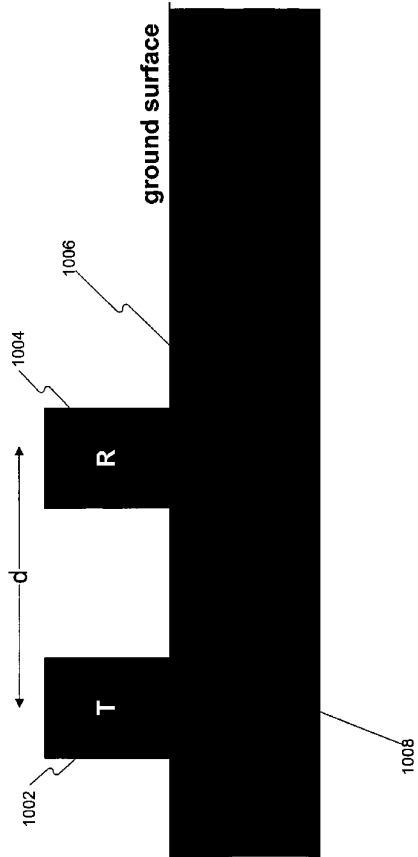


FIG. 10



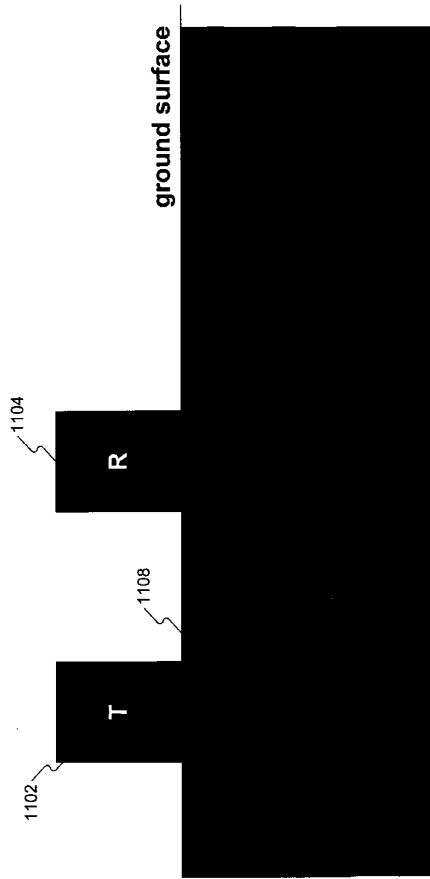


FIG. 11

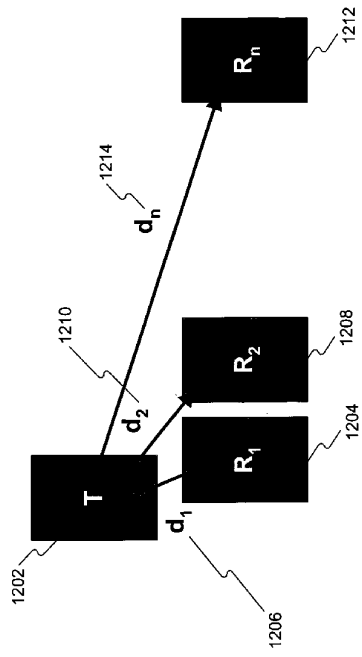


FIG. 12

WO 02/086542

PCT/US02/08274

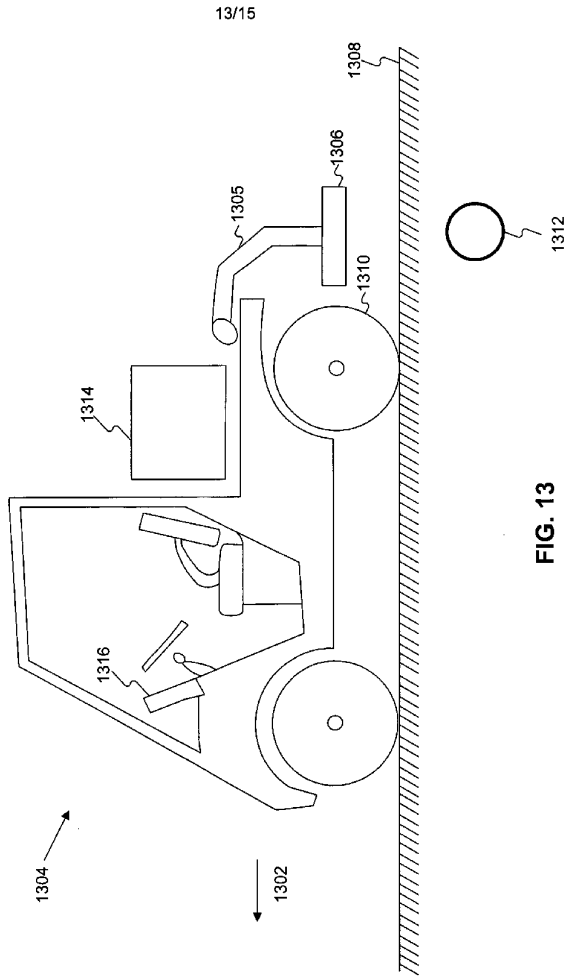


FIG. 13

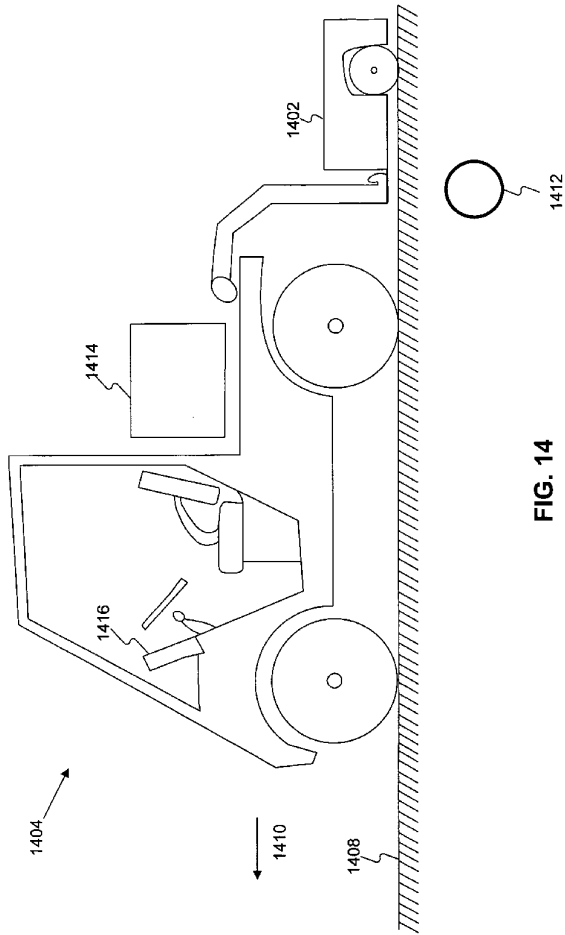


FIG. 14

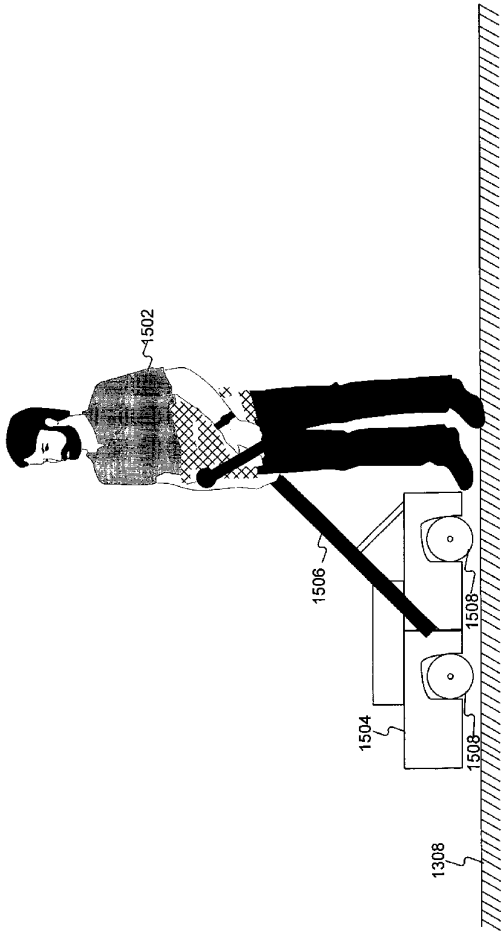


FIG. 15

【 国際公開パンフレット ( コレクション ) 】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

CORRECTED VERSION

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
31 October 2002 (31.10.2002)

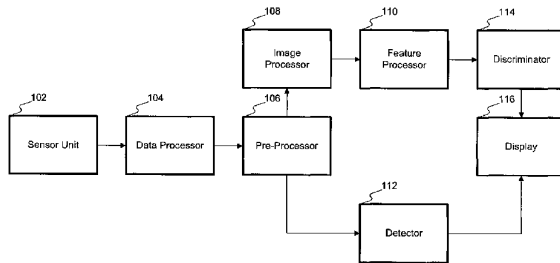
PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/086542 A2

- (51) International Patent Classification: G01V CZ, DE, DK, DM, DZ, IC, IE, ES, IT, GB, GD, GI, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, P1, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (21) International Application Number: PCT/US02/08274
- (22) International Filing Date: 22 April 2002 (22.04.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data:  
60/284,921 20 April 2001 (20.04.2001) US  
10/118,991 10 April 2002 (10.04.2002) US
- (71) Applicant and  
(72) Inventor: WITTEN, Alan, J. [ /US]; 3308 River Walk Court, Norman, OK 73072 (US).
- (74) Agents: GARRETT, Arthur, S. et al.; Finnegan, Henderson, Parabow, Garrett & Dunner, L.L.P., 1300 I Street, N.W., Washington, DC 20260-3315 (US).
- (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, IC, IE, ES, IT, GB, GD, GI, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, P1, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CI, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- (87) International Publication Number: WO 02/086542 A2
- (88) Date of publication of this corrected version: 9 January 2003
- (89) Information about Correction: see PCT Gazette No. 02/2003 of 9 January 2003, Section II
- (90) Date of publication of this corrected version: 9 January 2003
- (91) Information about Correction: see PCT Gazette No. 02/2003 of 9 January 2003, Section II

[Continued on next page]

(54) Title: A METHOD AND APPARATUS FOR IDENTIFYING BURIED OBJECTS USING GROUND PENETRATING RADAR



(57) Abstract: An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor, comprises a data processor for detecting spatial correlations in data received from a GPR sensor, in the apparatus and an image processor capable of building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor. A method for identifying a buried object using GPR in a system containing a GPR sensor comprising detecting spatial correlations in data received from the GPR sensor in the system and building a data structure corresponding to an image of the buried object from the received data.

WO 02/086542 A2

**WO 02/086542 A2** 

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

【 国際公開パンフレット ( コレクション ) 】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
31 October 2002 (31.10.2002)

PCT

(10) International Publication Number  
**WO 02/086542 A3**

(51) International Patent Classification: **G01V 3/12**,  
G01S 13/88

GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NZ, OM, PA, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TL, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(21) International Application Number: PCT/US02/08274

(22) International Filing Date: 22 April 2002 (22.04.2002)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:  
60/284,921 20 April 2001 (20.04.2001) US  
10/118,991 10 April 2002 (10.04.2002) US

(84) Designated States (regionally): ARIPPO patent (GI, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:  
with international search report

(71) Applicant and

(72) Inventor: WITTEN, Alan, J. [ /US]; 3308 River Walk Court, Norman, OK 73072 (US).

(88) Date of publication of the international search report:  
27 March 2003

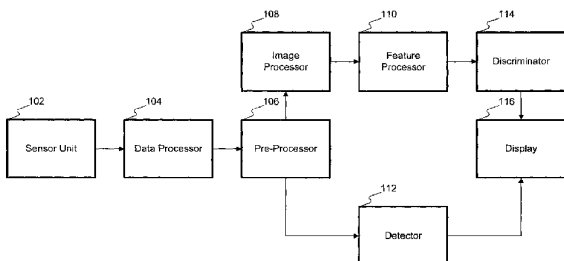
(74) Agents: GARRETT, Arthur, S. et al.; Finnegan, Henderson, Farabow, Garrett & Dunner, L.L.P., 1300 I Street, N.W., Washington, DC 20260-3315 (US).

(15) Information about Correction:  
Previous Correction:  
see PCT Gazette No. 02/2003 of 9 January 2003, Section II

(81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GU, GH,

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: A METHOD AND APPARATUS FOR IDENTIFYING BURIED OBJECTS USING GROUND PENETRATING RADAR



(57) Abstract: An apparatus for identifying a buried object using ground penetrating radar (GPR) in a system containing at least one GPR sensor (102), comprises a data processor (104) for detecting spatial correlations in data received from a GPR sensor (102) in the apparatus and an image processor capable of building a data structure corresponding to an image of the buried object from data processed by the data processor (104). A method for identifying a buried object using GPR in a system containing a GPR sensor (102) comprising detecting spatial correlations in data received from the GPR sensor in the system and building a data structure (108) corresponding to an image of the buried object from the received data.

WO 02/086542 A3



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US02/08274
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> IPC(7) : G01V 3/12; G01S 13/88 US CL : 342/22, 27, 90, 145, 179, 189, 191, 195, 197 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 342/22, 27, 90, 145, 179, 189, 191, 195, 197  Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) Please See Continuation Sheet		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5,704,142 A (STUMP) 06 January 1998 (06.01.98), see Abstract and Fig. 5 for GPR radar and imaging system.	1-33
A	US 5,384,715 A (LYTTON) 24 January 1995 (24.01.95), see Abstract and Claim 1 for GPR radar and subsurface characterization system.	1-33
A	US 4,835,474 A (PARRA et al) 30 May 1989 (30.05.89), see Abstract and Fig. 1 for GPR radar and mobile system.	1-33
A	US 4,698,634 A (ALONGI et al) 06 October 1987 (06.10.87), see Abstract and Figures 1 and 3 for mobile GPR system.	1-33
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance     "I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "B" earlier application or patent published on or after the international filing date     "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)     "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means     "E" document member of the same patent family "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 29 June 2002 (29.06.2002)		Date of mailing of the international search report 11 DEC 2002
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703)305-3230		Authorized officer John B. Sotomayor Telephone No. 703-308-1113

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/US02/08274

**Continuation of B. FIELDS SEARCHED Item 3:**

EAST

search terms: GPR, ground penetrating radar, spatial correlation, wave speed, mobile, hand-held

---

フロントページの続き

(81) 指定国 AP(GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW