(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) **N° de publication :** **2 804 469**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **01 01121**

(51) Int Cl[7] : **E 21 B 47/022,** E 21 B 47/04, G 01 V 1/44

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 26.01.01.

(30) **Priorité :** 28.01.00 US 09493481.

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 03.08.01 Bulletin 01/31.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC* — US.

(72) **Inventeur(s) :** BITTAR MICKAEL.

(73) **Titulaire(s) :**

(74) **Mandataire(s) :** ARMENGAUD AINE.

(54) OUTIL D'IMAGERIE PAR RESISTIVITE FOCALISEE SUR DES PROFONDEURS MULTIPLES POUR DES ENREGISTREMENTS PENDANT DES APPLICATIONS DE FORAGE.

(57) Un outil à résistivité destiné à être utilisé dans un système EPF comprend un réseau d émetteurs multiples disposés au-dessus d'une paire de récepteurs. Les émetteurs sont activés sélectivement, en provoquant l'induction d'un courant dans la bague de l'outil. Le courant axial dans la bague de l'outil est mesuré par la paire de récepteurs afin de déterminer la quantité de courant s'écoulant dans la formation entre les récepteurs. De là, la résistivité de la formation peut être mesurée pour chaque émetteur afin de fournir des profondeurs multiples d'investigation. En outre, le récepteur inférieur également peut être employé pour surveiller sélectivement la résistivité au niveau du trépan. Une pluralité d'électrodes discrètes est positionnée entre les deux récepteurs pour permettre une imagerie du trou de forage en obtenant des lectures de résistivité à sensibilité dans l'azimut basées sur le niveau de tension à chaque électrode discrète et la quantité de courant s'écoulant dans la formation. Dans un mode de réalisation, le niveau de tension de chaque électrode discrète est également additionné pour fournir une lecture de résistivité radiale en fonction des niveaux de tension additionnés et du courant s'écoulant dans la formation. Dans un deuxième mode de réalisation, une électrode en anneau est également prévue à partir de laquelle un niveau de tension est obtenu au voisinage du réseau de récepteurs afin d'être employé au calcul de la lecture de résistivité radiale. Selon un autre mode de réalisation, les électrodes discrètes sont formées comme dans des enregistreurs latéraux avec un disque central conducteur entouré par deux anneaux métalliques concentriques et un anneau métallique de focalisation. Dans ce mode de réalisation, les anneaux concentriques sont maintenus au même potentiel en modifiant la quantité dé courant émise à partir de l'anneau métallique de focalisation. En mesurant la quantité de courant émise, de même que la tension à un des anneaux concentriques, on peut obtenir une lecture de résistivité focalisée à sensibilité dans l'azimut.

FR 2 804 469 - A1

ARRIERE-PLAN DE L'INVENTION

Domaine de l'invention

La présente invention concerne généralement un outil à enregistrement pendant le forage (EPF) qui mesure la résistivité des formations adjacentes au puits de forage. Plus particulièrement, la présente invention concerne un outil d'EPF à résistivité

focalisée, avec des transmetteurs multiples pour procurer des profondeurs multiples d'investigation. Toujours en particulier, la présente invention concerne un ensemble de forage de fond de puits qui comprend un outil d'EPF à résistivité pour déterminer les caractéristiques du puits de forage et sa formation durant le forage d'un puits, et corréler ces informations avec la profondeur afin de produire une image d'une partie voulue du puits.

Arrière-plan de l'invention

Les opérations modernes de forage et de production pétrolière demandent une grande quantité d'informations concernant des paramètres et des conditions au fond du puits. Ces informations comprennent typiquement des caractéristiques des formations géologiques traversées par le trou du puits, en plus de données concernant la taille et la configuration du trou de forage lui-même. La collecte d'informations concernant des conditions au fond du puits, appelée communément « enregistrement », peut être effectuée suivant plusieurs procédés. L'enregistrement est connu dans l'industrie depuis de nombreuses années comme une technique pour fournir des informations concernant les formations géologiques particulières rencontrées au cours d'un forage. Pour un enregistrement conventionnel sur un puits pétrolier à ligne câblée, une sonde est abaissée dans le trou de forage, après qu'une partie ou la totalité du puits a été forée, et est utilisée pour déterminer certaines caractéristiques des formations traversées par le trou de forage. La sonde peut comprendre un ou plusieurs capteurs pour mesurer des paramètres au fond du puits et elle est typiquement fabriquée en tant que cylindre d'acier hermétiquement fermé pour loger les capteurs qui pend à l'extrémité d'un long câble ou « ligne câblée ». Le câble ou la ligne câblée fournit un support mécanique à la sonde et fournit également une connexion électrique entre les capteurs et les instruments associés à l'intérieur de la sonde et l'équipement électrique disposé à la surface du puits. Normalement, le câble alimente en énergie la sonde et est utilisé comme conducteur électrique pour transmettre des signaux d'information de la sonde jusqu'à la surface et des signaux de commande de la surface jusqu'à la sonde. Suivant les techniques conventionnelles, divers paramètres des formations géologiques sont mesurés et corrélés avec la position de la sonde dans le trou de forage, lorsque la sonde est retirée par le haut du puits.

Les capteurs utilisés dans une sonde à ligne câblée peuvent inclure un dispositif source, pour transmettre de l'énergie dans la formation, et un ou plusieurs récepteurs pour détecter l'énergie réfléchie par la formation. Divers capteurs ont été utilisés pour déterminer des caractéristiques particulières de la formation, y compris des capteurs de résistivité, des capteurs nucléaires et des capteurs acoustiques. Voir également « A Practical Introduction to Borehole Geophysics » par J. Labo (society of Exploration Geophysicists 1986) et « Six Arm Dipmeter » Halliburton Logging Services Copyright 1989.

Bien que l'enregistrement par ligne câblée soit utile pour l'assimilation d'informations concernant les formations au fond du puits, il présente néanmoins certains inconvénients. Par exemple, avant que l'outil d'enregistrement à ligne câblée puisse être mis en fonction dans le trou de forage, l'ensemble de train de forage et de fond de puits doit d'abord être retiré du trou de forage, avec pour résultat un coût considérable et une perte de temps de forage pour le foreur (qui paye typiquement un loyer quotidien pour la location de l'équipement de forage). De plus, puisque les outils à ligne câblée sont incapables de collecter des données durant l'opération de forage effectif, la compagnie de forage doit de temps en temps prendre des décisions (telles que la direction de forage) éventuellement sans informations suffisantes, ou risque autrement d'avoir à assumer le coût du retrait du train de forage pour faire passer un outil d'enregistrement en vue de collecter davantage d'informations concernant les conditions au fond du puits. En outre, puisque l'enregistrement à ligne câblée a lieu une période de temps relativement longue après que le trou de forage a été foré, la précision de la mesure à ligne câblée peut être compromise. Comme le comprendra l'homme de l'art, les conditions dans le puits de forage tendent à se dégrader lorsque des fluides de forage envahissent la formation au voisinage du trou de forage.

En conséquence, un outil à résistivité utilisé un ou plusieurs jours après qu'une section de trous de forage a été forée peut produire des mesures influencées par la résistivité de la boue qui a envahi la formation. En outre, la forme du trou de forage peut commencer à se dégrader, réduisant la précision des mesures. Ainsi, en général, plus les conditions de formation peuvent être mesurées tôt, plus la lecture à de

chances d'être précise. En outre, dans certains puits, tels que des puits horizontaux, des outils à ligne câblée ne peuvent pas être utilisés.

A cause de ces limitations associées à l'enregistrement à ligne câblée, il existe une demande croissante de développer des outils pouvant collecter des données durant le processus de forage lui-même. En collectant et en traitant des données ainsi qu'en les transmettant à la surface en temps réel (ou quasiment en temps réel), pendant le forage du puits, le foreur peut analyser plus précisément la formation environnante, et peut également apporter des modifications ou des corrections, si nécessaires, pour optimiser les performances du forage. Avec un système conductible, le foreur peut modifier la direction de progression de la tête de forage. En détectant les limites d'un gisement adjacent, on peut réaliser des ajustements pour maintenir la tête de forage dans une couche ou région renfermant du pétrole. En outre, la mesure des paramètres de formation durant le forage, et heureusement avant l'invasion de la formation augmente l'utilité des données mesurées. De plus, effectuer des mesures de la formation et du trou de forage durant le forage permet de réaliser des économies en termes de temps de derrick qui autrement serait nécessaire pour faire passer un outil à ligne câblée.

Les conceptions pour mesurer les conditions au fond du puits et le déplacement et la position de l'ensemble de forage, de façon quasi simultanée au forage du puits, sont appelées des techniques de « mesure pendant le forage » ou « MPF ». Des techniques similaires, se concentrant davantage sur la mesure de paramètres de la formation du type associé aux outils à ligne câblée, sont appelées des techniques de « enregistrement pendant le forage » ou « EPF ». Bien que des distinctions entre MPF et EPF puissent exister, les termes MPF et EPF sont souvent utilisés de façon interchangeable. Pour la présente description, le terme EPF sera utilisé de façon générique en signifiant des systèmes qui collectent des paramètres de la formation soit seuls soit en combinaison avec la collecte d'informations concernant la position de l'ensemble de forage.

Ordinairement, un puits est foré verticalement sur au moins une partie de sa profondeur finale. Les couches ou strates qui constituent la croûte terrestre sont

généralement sensiblement horizontales. Donc, durant un forage vertical, le puits est sensiblement perpendiculaire aux formations géologiques à travers lesquelles il passe. Dans certaines applications cependant, comme lorsque le forage est effectué depuis une plate-forme en mer ou lorsque le forage s'effectue à travers des formations dont les limites s'étendent horizontalement, il est souhaitable de forer des puits orientés plus horizontalement. Lors d'un forage horizontal, il est souhaitable de maintenir le trou de forage dans la zone intéressante (la formation contenant les hydrocarbures) autant que possible de façon à maximiser la production. Ceci peut être difficile puisque les formations changer de profondeur ou diverger. Ainsi, pendant une tentative pour forer et maintenir le trou de forage à l'intérieur d'une formation particulière, la tête de forage peut approcher une limite de gisement. Nombreux sont ceux dans l'industrie qui souhaiteraient un système EPF qui puisse être spécialement utilisé pour détecter des limites de gisement et fournir des données en temps réel au foreur pour lui permettre d'effectuer des corrections de direction afin de se maintenir dans la zone intéressante. En variante, le système EPF pourrait être utilisé en tant que partie d'un système « intelligent » maintenant automatiquement la tête de forage dans la zone intéressante. Voir, par exemple, le brevet U.S. n° 5 332 048, dont les enseignements sont incorporés ici à titre de références. L'emploi d'un système EPF avec ces autres systèmes rend possible d'effectuer une conduite automatique d'au moins certaines parties du forage.

La mesure des propriétés de la formation durant le forage du puits par des systèmes EPF améliore ainsi le degré d'actualité des données mesurées et donc augmente l'efficacité des opérations de forage. Typiquement, des mesures EPF sont utilisées pour fournir des informations concernant la formation particulière que le trou de forage croise. Actuellement, des capteurs ou outils d'enregistrement utilisés communément comme faisant partie d'un système à ligne câblée ou EPF comprend des outils à résistivité. Pour qu'une formation contienne des hydrocarbures et autorise les hydrocarbures à s'écouler à travers elle, la roche constituant la formation doit présenter certaines caractéristiques physiques bien connues. Une caractéristique est que la formation ait une certaine résistivité mesurable (l'inverse de la conductivité), qui peut être déterminée par des transducteurs appropriés dans le train de forage. L'analyse des données provenant de ces transducteurs procure des

informations concernant la résistivité de la formation entourant l'outil à résistivité, celles-ci peuvent alors être utilisées en combinaison avec d'autres mesures pour prédire si la formation contiendra des hydrocarbures. En outre, un changement brutal de la résistivité mesurée, à la limite entre strates de schiste argileux et de grès, peut être utilisé pour localiser ces limites. En forant horizontalement, la tête de forage peut de préférence être alors conduite pour éviter cette limite et maintenir le trou de forage à l'intérieur du gisement pétrolifère. Cependant, pour effectuer cette détection avec fiabilité, un grand nombre de données sont nécessaires en provenance de l'outil à résistivité.

Pour empêcher des explosions, les puits sont typiquement forés avec une pression hydrostatique positive, de sorte que la pression dans le trou de forage est supérieure à la pression dans la formation. La pression hydrostatique positive régnant dans le trou de forage résulte du pompage dans le puits d'une boue de forage de formulation spéciale, au cours du processus de forage. Puisque la boue de forage est maintenue à une pression supérieure à celle de la formation, la boue tend à envahir la formation perméable entourant le trou de forage, en forçant l'eau présente à l'origine à être chassée de la zone du trou de forage. Cette décharge de boue de forage s'infiltrant dans la formation crée une zone envahie ou purgée autour du trou de forage, avec une zone de transition entre les zones purgées et laissées tel quel. La profondeur de pénétration de la boue de forage est une fonction de la porosité de la formation, de la pression différentielle de forage, de la perméabilité de la formation, de la perte d'eau du fluide de forage et du temps.

A cause de cette pénétration de la formation par le fluide de forage, il est généralement souhaitable que l'outil à résistivité effectue des mesures à des profondeurs multiples dans la formation autour du trou de forage, entre l'émetteur et le récepteur. En utilisant plusieurs capteurs à résistivité, chacun répondant essentiellement à une profondeur différente d'investigation (telle que profonde, moyenne et proche), les capteurs de lecture les plus profonds peuvent être corrigés selon les mesures obtenues depuis les capteurs de lecture les plus proches.

Ainsi, en se référant à la figure 1, le premier et plus proche diamètre d'investigation, par rapport à l'outil à résistivité, est la région du trou de forage à travers laquelle la boue de forage s'écoule en retournant vers la surface. Si la résistivité de cette région est mesurée à l'intérieur du puits (autour de l'outil proprement dit), la valeur de résistivité obtenue sera globalement environ la résistivité de la boue de forage, R_m. Ce diamètre d'investigation peut être appelé D_m, afin d'indiquer que celui-ci représente la profondeur d'investigation produisant une lecture de résistivité de la boue de forage. La région générale suivante d'investigation est la région de la formation environnante qui a été envahie par la boue de forage. Ce diamètre d'investigation peut être appelé D_i, puisqu'une mesure de résistivité dans cette région produira la résistivité de la zone envahie, qui peut être indiquée par R_{xo}. La troisième région d'investigation pour un outil à résistivité est la formation qui n'a pas été envahie par la boue de forage. Une mesure de résistivité de cette région produira la vraie valeur de résistivité R_t de la formation. Bien que les informations concernant R_m et R_{xo} soient utiles pour une évaluation, un des buts de l'outil à résistivité est de mesurer la vraie résistivité R_t de la formation. Ainsi, il est important de concevoir un outil à résistivité ayant des profondeurs suffisantes d'investigation pour mesurer cette résistivité.

Comme le comprendra l'homme de l'art, il existe divers types d'outils de mesure de résistivité utilisés pour enregistrer des puits. Comme décrit de manière générale par Darwin Ellis dans "Well Logging for Earth Scientists" pages 84 à 91 (Elsevier 1987), des dispositifs à résistivité focalisée ou Laterologs sont des dispositifs à électrodes qui forcent un courant de mesure dans la formation. Le concept de focalisation est représenté sur la figure 2, trois électrodes émettrices de courant A_0, A_1 et $A_{1'}$ sont représentées dans une configuration Laterolog-3. Le potentiel des électrodes A_1 et $A_{1'}$ est maintenu constant et égal au potentiel de l'électrode centrale A_0. Puisqu'un courant circule seulement si une différence de potentiel existe entre les électrodes, théoriquement aucun courant ne s'écoule verticalement entre les électrodes. Ainsi, comme le montre la figure 2, un fourreau de courant émane horizontalement de l'électrode centrale A_0. La quantité de courant émanant de l'électrode A_0 peut être utilisée pour déterminer la résistivité de la formation au moyen de la loi d'Ohm.

Un mode de réalisation d'un dispositif à résistivité focalisée est décrit dans le brevet U.S. n° 3 305 771, délivré à Arps. Comme le décrit ce brevet, une paire d'émetteurs toriques est montée dans une sonde d'enregistrement, positionnée au-dessus et au-dessous d'une paire de récepteurs toriques. Un générateur de courant alternatif excite les émetteurs toriques, qui induisent un courant dans la formation. Les récepteurs sont disposés symétriquement par rapport aux émetteurs et détectent le courant qui tend le tore pour pénétrer dans la formation entre les deux récepteurs. Puisque la tension de source est connue, la résistivité de la formation au voisinage des récepteurs peut être déterminée par :

$$R = k\,(V / I),$$

R étant la résistivité de la formation, V étant la tension de source, I étant le courant mesuré s'écoulant dans la formation entre les récepteurs toriques (c'est-à-dire la différence entre les courants mesurés à chaque récepteur) et k étant une constante de l'outil dépendant de l'espacement des tores.

Des outils à résistivité basés généralement sur le système décrit dans le brevet de Arps ont été utilisés pendant de nombreuses années. Un exemple d'un tel outil peut être trouvé dans « A New Generation of Electrod Resistivity Measurements for Formation Evaluation while Drilling » de S. Bonner et al., SPWLA 35th Annual Loggin Symposium, 19 au 22 juin 1994. Voir également le brevet U.S. n° 5 339 037. Une simple illustration de l'outil EPF décrit dans l'article de Bonner et al. est représentée sur la figure 3. L'outil EPF décrit dans cet article effectue cinq mesures de résistivité de formation au moyen de deux émetteurs toriques. Une mesure de résistivité utilise la tête de forage comme partie de l'électrode de mesure. Les quatre autres mesures de résistivité sont caractéristiques des mesures de résistivités focalisées par électrodes à haute résolution verticale. Une des mesures à haute résolution verticale utilise une électrode en anneau pour mesurer une résistivité moyenne dans l'azimut. Les trois autres électrodes à haute résolution verticale utilisent des électrodes en bouton alignées verticalement pour effectuer des mesures de résistivité à sensibilité dans l'azimut. Ensemble, l'anneau et les boutons donnent un total de quatre profondeurs d'investigation. Bien que l'outil EPF décrit dans

l'article de Bonner et al. fournisse des profondeurs multiples d'investigation, il présente de sérieux inconvénients. Un de ceux-ci est que trois des quatre mesures de résistivité à haute résolution verticale sont à sensibilité dans l'azimut. Ainsi, trois des quatre mesures à haute résolution sont sensibles à l'orientation de l'outil dans le trou de forage. Ceci peut poser un problème si l'ensemble de fond du puits n'est pas rotatif. Ainsi, si l'ensemble de fond du puits est conduit (ou « coulisse »), l'outil EPF de Bonner et al. possédera un seul capteur permettant d'obtenir des mesures de résistivité à haute résolution autour du trou de forage. Les trois autres capteurs pointeront dans la même direction et ne seront donc pas à même de réaliser des mesures de résistivité autour de la circonférence entière du trou de forage. De même, si on utilise un train de forage qui n'est pas entraîné en rotation au cours d'opérations normales de forage, le système de Bonner et al. aura des applications limitées. Ainsi, dans des applications où le train de forage n'est pas entraîné en rotation, l'outil de Bonner et al. ne permettra pas d'obtenir une image du trou de forage à partir des électrodes en bouton.

Bien que la conception de Bonner et al. incorpore une configuration à deux émetteurs, il est connu d'employer des émetteurs supplémentaires pour obtenir davantage de profondeurs d'investigation lors des mesures de résistivité. Par exemple, il a été suggéré d'employer quatre émetteurs avec une paire de récepteurs dans un outil à résistivité standard. Voir « A true Multiple Depth of Investigation Electromagnetic Wave Resistivity Sensor : Theory, Experiment and Prototype Field Test Results" de M.S. Bittar et al., présenté à la "66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineer" du 6 au 9 octobre 1991, et "Formation Evaluation Utilizing a new NWD Multiple Depth of Investigation Resistivity Sensor", de S. Ball et al., présenté au "Fifteenth European Formation Evaluation Symposium" du 5 au 7 mai 1993. Chaque émetteur est activé séquentiellement, des mesures d'atténuation et de décalage de phase étant effectuées en fonction de l'amplitude et du placement temporel des signaux reçus par la paire de récepteurs.

Des tentatives ont été effectuées pour développer des outils EPF pouvant être utilisés pour fournir une image du trou de forage. Des outils d'imagerie ont été utilisés dans

des outils à ligne câblée pendant un certain nombre d'années pour obtenir des images instantanées du trou de forage à des profondeurs particulières. Ainsi, par exemple, le cessionnaire de la présente invention a utilisé un outil d'enregistrement acoustique comme dispositif d'imagerie à ligne câblée. Voir « Open Hole Services » (Halliburton Loggin Services 1992) page 28. Ce dispositif est appelé communément l'Outil de Balayage Acoustique Circonférentiel (ou OBAC). Un exemple d'un outil d'imagerie EPF est représenté dans le brevet U.S. n° 5 899 958.

Bien que les outils et systèmes précités fonctionnent bien dans les applications pour lesquelles ils sont conçus, il serait souhaitable de développer un outil à résistivité EPF pouvant obtenir des mesures de résistivité focalisée à des profondeurs multiples, tout en fournissant également une image du trou de forage indépendamment du fait que l'outil soit tourné ou non. Tandis que les avantages d'un tel outil apparaissent immédiatement à l'homme de l'art, jusqu'à présent personne n'a mis en œuvre avec succès un tel système qui dépasse les limitations précitées.

BREF RESUME DE L'INVENTION

Les problèmes cités plus haut sont résolus en grande partie par un outil d'enregistrement à résistivité focalisée qui comprend des émetteurs toriques multiples disposés symétriquement ou asymétriquement par rapport à une paire de récepteurs toriques afin d'obtenir trois profondeurs différentes d'investigation. En outre, une pluralité d'électrodes en bouton ou rectangulaires sont disposées autour de la circonférence de l'outil d'enregistrement afin de fournir une image du trou de forage en utilisant le même réseau d'émetteurs et de récepteurs. L'emploi d'électrodes multiples en bouton autour de la circonférence de l'outil permet la formation d'une image du trou de forage, même si le train de forage ne tourne pas, comme cela peut être le cas lorsque l'ensemble de fond de puits est conduit, ou lorsque des matériaux de train de forage spéciaux sont utilisés. Dans le mode de réalisation préféré, la tête de forage est également utilisée pour obtenir une résistivité à la tête qui peut servir à une détection à l'avance des limites de gisements.

Dans le mode de réalisation préféré, chacun des émetteurs est activé alternativement pour induire un courant axial dans l'outil. Le courant s'écoulant dans la formation entre les enroulements récepteurs est déterminé en mesurant le courant axial à chacun des récepteurs toriques. La différence de courant axial mesurée par les récepteurs indique le courant s'écoulant dans la formation. Cette mesure de courant peut alors être utilisée pour déterminer la résistivité de la formation au moyen de la loi d'Ohm. Les émetteurs multiples autorisent des mesures de courant depuis des émetteurs espacés différemment, en fournissant ainsi des profondeurs d'investigation multiples.

Dans un mode de réalisation de l'invention, une ou plusieurs électrodes en anneau sont prévues au voisinage des récepteurs toriques et sont utilisées pour mesurer la résistivité de la formation. En plus de la mesure du courant axial au niveau des récepteurs toriques, qui détermine le courant radial I_S, la tension (V_{ring}) à l'électrode en anneau est mesurée et utilisée pour déterminer la résistivité de la formation. La résistivité de la formation R à chaque profondeur d'investigation j est donnée par :

$$R_{ej}=K_j\frac{V_{ringi}}{I_{sj}}$$

K représente une valeur constante qui est déterminée par l'espacement des émetteurs et des récepteurs.

En plus d'utiliser les électrodes en anneau pour déterminer la résistivité de la formation, une pluralité d'électrodes discrètes est de préférence également incluse pour fournir des images du trou de forage. Les électrodes peuvent prendre une quelconque parmi une diversité de formes, y compris une forme rectangulaire ou circulaire. Les électrodes peuvent se monter sur le train de forage entre les récepteurs toriques, et sont de préférence espacées autour de la circonférence de l'outil de forage. La tension de chacune des électrodes (V_e) est mesurée et est utilisée pour déterminer une mesure à sensibilité dans l'azimut de la résistivité de la formation (R_e) pour chaque profondeur j d'investigation.

$$R_{ej}=K_j\frac{V_{ej}}{I_{sj}}$$

Suivant le mode de réalisation préféré de la présente invention, au moins trois électrodes discrètes sont espacées sur la circonférence autour du train de forage pour fournir des images de la résistivité selon trois orientations différentes. Ces images peuvent être coordonnées avec la profondeur et l'orientation dans l'azimut pour fournir une image de la résistivité du trou de forage à certains intervalles définis.

Suivant une variante de mode de réalisation, les électrodes en anneau peuvent être éliminées si un nombre suffisant d'électrodes discrètes est prévu. Dans ce mode de réalisation, les électrodes discrètes sont disposées autour de la circonférence de l'outil de forage, les valeurs de résistivité pour chaque électrode discrète pouvant être obtenues pour déterminer la résistivité de la formation à sensibilité dans l'azimut :

$$R_{ej}=K_j\frac{V_{ej}}{I_{sj}}$$

V_{ej} étant la tension à chaque électrode. Si le nombre d'électrodes en bouton est suffisant (par exemple, huit ou davantage d'électrodes discrètes sont prévues, espacées à 45°) l'électrode en anneau peut être éliminée en effectuant la sommation des tensions de toutes les électrodes en bouton afin d'obtenir une tension d'anneau apparent (V_{ring}) :

$$V_{ring}\cong\sum_{i=1}^{N}V_{ei}$$

N représentant le nombre d'électrodes discrètes et V_{ei} la tension à chaque électrode.

Les électrodes discrètes constituent une structure métallique montée sur la bague. Les électrodes sont isolées électriquement de la bague. Dans encore un autre mode de réalisation de la présente invention, les électrodes sont configurées en réseau d'enregistrement latéral circulaire, avec un disque de métal intérieur entouré par trois anneaux métalliques extérieurs. Le disque intérieur et les anneaux extérieurs sont tous séparés par un matériau isolant. Ces électrodes sont actionnées pour forcer un courant à sortir du disque interne en commandant la tension des anneaux extérieurs.

Ceux-ci et d'autres avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée de la présente invention, en conjonction avec les dessins annexés.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Pour une description détaillée des modes de réalisation préférés de l'invention, on fera référence maintenant aux dessins annexés dans lesquels :

la figure 1 représente les mesures de résistivité obtenues à différentes profondeurs d'investigation ;

la figure 2 montre un outil à résistivité de la technique antérieure qui fonctionne en Laterolog en focalisant un courant dans la formation entourant un outil à résistivité ;

la figure 3 montre un outil à résistivité de la technique antérieure qui focalise un courant dans la formation en utilisant une électrode en anneau et trois électrodes en bouton, en conjonction avec une paire d'émetteurs toriques ;

la figure 4 montre un outil à résistivité fabriqué suivant un mode de réalisation de la présente invention, qui comprend trois émetteurs toriques, une paire de récepteurs toriques, deux électrodes en anneau et un réseau d'électrodes discrètes placées autour de la circonférence de l'outil ;

la figure 5 montre une variante de réalisation de la présente invention comprenant trois émetteurs toriques, une paire de récepteurs toriques et un réseau d'électrodes discrètes placées autour de la circonférence de l'outil ;

les figures 6a et 6b sont des vues en coupe montrant le placement des électrodes en bouton des figures 4 et 5, respectivement ;

la figure 7 est une représentation d'un puits en cours de forage à travers des formations souterraines selon des pratiques de forage typiques ; et

la figure 8 représente une électrode comme dans les figures 4 et 5, fabriquée suivant une variante de réalisation.

NOTATION ET NOMENCLATURE

Pendant la description qui précède et qui suit, les termes « au-dessus » et « au-dessous » sont utilisés pour indiquer la position relative de certains éléments par rapport à la direction d'écoulement de la boue de forage. Ainsi, si un élément est décrit comme étant au-dessus d'un autre, cela signifie que la boue de forage s'écoule d'abord à travers le premier élément avant de s'écouler à travers le deuxième élément. Comme il apparaîtra à l'homme de l'art, ceux-ci et d'autres termes sont utilisés pour identifier la position relative d'éléments dans un ensemble de fond de puits (ou BHA) par rapport à la distance jusqu'à la surface du puits, mesurée le long du trajet de forage.

De même, le terme « accouplement » ou « couples » signifie une connexion directe ou indirecte. Ainsi, si un premier dispositif est couplé à un deuxième dispositif, cette connexion peut s'effectuer directement ou indirectement par l'intermédiaire d'autres dispositifs et connexions.

DESCRIPTION DETAILLEE DES MODES DE REALISATION PREFERES

En se référant tout d'abord à la figure 7, une installation de forage comprend un derrick 10 à la surface 12 d'un puits, supportant un train de forage 14. Le train de forage 14 s'étend à travers une table rotative 16 et dans un trou de forage 18 qui est foré à travers des formations géologiques 20 et 21. Le train de forage 14 comporte une tige carrée 22 à son extrémité supérieure, un tube de forage 24 couplé à la tige carrée 22, et un ensemble de fond de puits 26 (appelé communément « BHA ») couplé à l'extrémité inférieure du tube de forage 24. En variante, le train de forage peut comporter une section de tubes enroulés au lieu du, ou en plus du, tube de forage. Le BHA 26 peut comprendre une tête de forage 32, un moteur de fond de puits 40, une ou plusieurs bagues de trépan 28, un outil à résistivité 100 monté sur une section de bague 55, des capteurs directionnels disposés dans une section non magnétique 60 et

un ou plusieurs stabilisateurs (non représentés) pour forer à travers des formations géologiques afin de créer le trou de forage 18. En fonctionnement, la tige carrée 22, le tube de forage (ou tube enroulé) 24 et le BHA 26 sont sélectivement entraînés en rotation par la table rotative 16. Les bagues de trépan 28, qui peuvent également être non magnétiques de façon à ne pas interférer avec les mesures EPF, sont utilisées suivant des techniques conventionnelles pour ajouter du poids à la tête de forage 32 et pour rigidifier le BHA 26, en permettant ainsi au BHA 26 de transmettre le poids à la tête de forage 32 sans se reboucler. Le poids appliqué par les bagues de traitement 28 à la tête 32 permet à celle-ci de pénétrer à travers des formations souterraines.

Lorsque la tête de forage 32 fonctionne, un fluide ou boue de forage est pompé depuis un puits de boue 34 à la surface, par l'intermédiaire du tuyau de la tige carrée 37, jusque dans le tube de forage (ou tube enroulé) 24 jusqu'à la tête de forage 32. Après s'être écoulée à travers la tête de forage 32, la boue de forage s'élève en retournant vers la surface à travers la zone annulaire entre le tube de forage 24 et le trou de forage 18, où elle est collectée et renvoyée au puits de boue 34 pour décantation. La boue de forage est utilisée pour lubrifier la tête de forage 32 et pour retirer les déchets du trou de forage 18. La boue de forage peut également effectuer un certain nombre d'autres fonctions, qui peuvent comprendre la fourniture d'énergie au moteur de fond de puits ou à d'autres éléments au fond du puits. Comme le réalisera l'homme de l'art, le moteur de fond de puits ou turbine 40 peut être utilisé au fond du puits pour entraîner en rotation la tête de forage 32 en variante, ou en plus, de l'entraînement du train de forage depuis la surface. Comme le montre la figure 7, le BHA 26 est typiquement défini comme l'ensemble de tous les composants au fond du puits, depuis le sommet des bagues de trépan 28 jusqu'à la pointe de la tête de forage 32, y compris le moteur de fond de puits 40.

Comme il est connu dans la technique, la section non magnétique 60 inclut typiquement des capteurs directionnels et des capteurs de paramètres de forage tels que le poids sur la tête (WOB), le couple sur la tête (TOB), les chocs, les vibrations, etc. Dans un mode de réalisation, des capteurs directionnels sont prévus dans le BHA 26 pour donner une indication de l'angle d'inclinaison, de l'angle horizontal et de

l'angle de rotation (« angle de face d'outil ») du BHA 26. Suivant des techniques connues, des mesures de direction de trou de forage peuvent être effectuées.

L'outil EPF 55 est de préférence disposé au voisinage de la tête de forage 32 afin de permettre l'examen de la formation de façon aussi proche que possible de la tête de forage. Comme le comprendra l'homme de l'art, l'outil EPF 55 pourrait également être disposé plus haut sur le BHA 26, par rapport à la tête de forage 32, sans quitter les principes de la présente invention. En outre, l'outil EPF 55 peut, en fait, constituer des sections de bagues multiples si nécessaires pour loger d'autres capteurs EPF. Les capteurs de formation EPF comprennent de préférence l'outil de résistivité 100, qui est décrit plus en détail en association avec la figure 4. D'autres capteurs de formation EPF peuvent être prévus si on le souhaite, y compris des capteurs de rayonnement gamma, sonores, de densité et de neutrons. Un ensemble de batterie, l'alimentation des communications souterraines ou une autre source d'énergie peut être incluse dans l'outil EPF 55 ou, en variante, être positionnée en un endroit commode quelconque pour fournir l'alimentation des divers ensembles électriques dans le BHA.

En se référant toujours à la figure 7, une unité 35 de signalisation de données de fond de puits peut également être prévue comme partie du BHA 26 et peut être utilisée pour transmettre des données détectées ou traitées jusqu'à un récepteur de surface par l'intermédiaire d'un signal en impulsion dans la boue. La boue de forage peut servir de moyen de communication entre le dispositif de commande et les composants à la surface du puits. En modifiant le débit de la boue de forage à travers l'intérieur du train de forage (ou tube enroulé), des impulsions de pression peuvent être engendrées dans la colonne de boue de forage. En faisant varier sélectivement des impulsions de pression grâce à l'emploi d'un générateur d'impulsions de boue dans l'unité 35 de signalisation de boue, des signaux codés d'impulsion de pression peuvent être générés pour transmettre des informations indicatives de paramètres de fond de puits jusqu'à la surface pour une analyse immédiate. De plus, le système de fond de puits peut également être capable de recevoir des signaux d'impulsion de boue provenant de la surface afin de commander l'actionnement ou l'activation de certains capteurs EPF ou autres composants au fond du puits. En variante, un train de

forage composite doté de fils encastrés pourrait être utilisé pour transmettre des données à la surface, ou les données pourraient être mémorisées au fond du puits afin d'être traitées lorsque le BHA est retiré. Suivant le mode de réalisation préféré, le fluide de forage est une boue conductrice afin de faciliter le passage du courant focalisé dans la formation.

Un dispositif de commande ou interface de communication de fond de puits (non représenté sur la figure 7) peut commander le fonctionnement de l'unité de signalisation 35 et orchestrer l'actionnement des capteurs EPF et autres éléments du BHA. Le dispositif de commande peut être localisé dans la section 60 ou ailleurs dans le BHA 26. Le dispositif de commande également peut prendre des décisions en fonction des données traitées.

Un ou plusieurs stabilisateurs peuvent être prévus faisant partie de l'ensemble de fond de puits. Le ou les stabilisateur(s) peuvent inclure des lames réglables suivant la description des brevets U.S. n° 5 318 137 et n° 5 318 138, dont les enseignements sont incorporés à titre de référence, comme s'ils étaient complètement présentés ici. Comme le décrivent ces inventions, l'inclinaison de l'ensemble de fond de puits peut être modifiée en faisant varier sélectivement l'extension des lames stabilisatrices. Comme le comprendra immédiatement l'homme de l'art, la course du BHA 26 peut également être modifiée suivant d'autres techniques, comme en mettant en marche ou en coupant sélectivement un moteur de fond de puits, en ajustant l'angle de courbure d'un logement de moteur courbe ou en changeant le poids sur la tête du système. L'emploi d'éléments réglables ou paramètres de forage en conjonction avec un système EPF comme décrit ici rend possible de concevoir un « système intelligent » pour forer automatiquement certaines parties du puits. En variante, un quelconque autre système ou ensemble adéquat peut être utilisé pour un forage directionnel sans quitter le cadre des enseignements présentés ici. Par exemple et comme mentionné plus haut, des tubulures enroulés peuvent être utilisées dans les systèmes de forage, avec un dispositif à moteur ou à chenille. L'homme de l'art comprendra par conséquent que le système EPF décrit ici peut être utilisé dans un système ou opération de forage quelconque dans laquelle il est souhaitable de

détecter et localiser des formations et des limites de gisement, indépendamment de l'ensemble de fond de puits et des éléments de train de forage employés.

En se référant maintenant à la figure 4, l'outil à résistivité 100 fabriqué suivant le mode de réalisant préféré comprend généralement un premier, un deuxième et un troisième émetteur (indiqué par T_1, T_2 et T_3 respectivement), un premier et un deuxième récepteur (indiqué par R_1 et R_2 respectivement), une électrode en anneau 110 et un réseau d'électrodes discrètes 125. Bien que trois émetteurs soient prévus dans le mode de réalisation préféré, un nombre différent d'émetteur peut être employé si on le souhaite. En outre, l'outil à résistivité fonctionne en conjonction avec la résistivité mesurée au niveau de la tête de forage 32, et cette tête de forage 32 est donc représentée sur la figure 4 à titre d'illustration. D'autres éléments de fond de puits ont été omis de la figure 4 pour des raisons de clarté, ainsi l'homme de l'art comprendra que d'autres éléments peuvent être inclus dans l'ensemble de fond de puits suivant les pratiques normales de l'industrie.

Suivant le mode de réalisation préféré de la figure 4, chacun des émetteurs T_1, T_2 et T_3 comporte des tores montés sur l'outil à résistivité 100 et espacés à équidistance autour de la bague 150 de l'outil à résistivité 100. Les tores sont constitués de préférence par un fil conducteur 105 enroulé autour d'un noyau magnétique 110. Comme il apparaîtra à l'homme de l'art, le fil conducteur 105 est couplé à un générateur de courant alternatif 140 qui provoque le passage d'un courant à travers l'enroulement. Ce passage de courant à travers l'enroulement constitue le primaire d'un transformateur, qui induit un courant dans la bague de l'outil à résistivité. Le retour du courant induit s'effectue à travers la formation.

Les enroulements toriques des émetteurs T_1, T_2 et T_3 sont mis sous tension sélectivement au moyen de circuits conventionnels, comprenant un microprocesseur 200, un générateur de courant alternatif 140, un amplificateur de puissance 130 et une logique de sélection d'émetteur 120. Comme le montre la figure 4, le générateur 140 est relié électriquement au microprocesseur 140 pour recevoir un ou plusieurs signaux de commande provenant du microprocesseur 200. Le générateur 140 est relié électriquement à l'amplificateur de puissance 130 qui reçoit et amplifie le signal de

sortie du générateur 140. Le générateur 140 génère de préférence un signal de fréquence relativement basse dans la plage de 1000 à 2000 Hz qui est amplifié par l'amplificateur de puissance 130. Dans le mode de réalisation préféré, un générateur unique 140 est couplé sélectivement à chacun des émetteurs T_1, T_2 et T_3 au moyen d'une logique 120 de sélection d'émetteur, qui reçoit le signal amplifié provenant de l'amplificateur de puissance. La logique 120 de sélection d'émetteur, qui peut par exemple comporter un circuit multiplexeur, est couplée de préférence au microprocesseur 200. Comme le comprendra l'homme de l'art, la logique de sélection d'émetteur 120 reçoit des signaux provenant du microprocesseur 200 qui déterminent quel émetteur torique recevra le signal amplifié. Ainsi, suivant un mode de réalisation, le microprocesseur fournit un signal à deux bits, soit en série soit en parallèle, qui sont couplés à une ou deux bornes d'entrée de sélection de la logique 120 de sélection d'émetteur. Ainsi, par exemple, si le microprocesseur 200 détermine que le signal amplifié doit être appliqué à l'émetteur T_1, le microprocesseur peut transmette un signal 01 (indiquant une tension numérique basse et une tension numérique haute) à la logique 120 de sélection d'émetteur. En réponse, la logique 120 de sélection d'émetteur fait passer le signal amplifié provenant du générateur 140 à l'émetteur torique T_1. D'autre part, si le microprocesseur 200 détermine que l'émetteur T_2 doit être activé, le microprocesseur peut envoyer un signal 10 à la logique 120 de sélection d'émetteur, pour faire en sorte que la logique 120 de sélection d'émetteur délivre le signal amplifié à l'enroulement T_2. De même, le microprocesseur peut envoyer un 11 à la logique 120 de sélection d'émetteur, pour faire en sorte que la logique de sélection d'émetteur délivre le signal amplifié à l'émetteur torique T_3. L'homme de l'art comprendra que les émetteurs particuliers à actionner peuvent être codés suivant un grand nombre de façons, et donc que le codage particulier utilisé pour sélectionner un émetteur n'est pas considéré comme limitatif. En outre, les circuits employés pour sélectionner un émetteur particulier peuvent également être modifiés sans quitter les principes de l'invention.

En se référant encore à la figure 4, les récepteurs R_1 et R_2 sont de préférence disposés au-dessous des émetteurs T_1, T_2 et T_3, afin que les mesures de résistivité s'effectuent plus près du trépan 32. Si on le souhaite, cependant, les récepteurs pourraient être disposés au-dessus du réseau d'émetteurs dans l'outil à résistivité 100. Les récepteurs

sont également de préférence constitués par des tores et sont généralement fabriqués de façon similaire aux émetteurs toriques, bien que d'autres configurations puissent être employées pour les récepteurs. Les récepteurs toriques R_1 et R_2 mesurent le courant axial induit dans la bague de forage à résistivité 150 par un émetteur. Le courant axial dans la bague agit comme le primaire d'un transformateur qui induit un courant dans les enroulements récepteurs. Le fil conducteur enroulé autour du noyau magnétique dans les récepteurs R_1 et R_2 est couplé à des circuits appropriés afin de déterminer la quantité de courant induite dans les enroulements récepteurs.

Dans le mode de réalisation préféré et comme le montre la figure 4, les récepteurs toriques R_1 et R_2 sont couplés à un circuit convertisseur courant / tension 171 et 173, respectivement, chacun d'eux comprenant un amplificateur opérationnel (174 et 174') et une résistance de contre-réaction (R_{f1} et R_{f2}). La valeur de la résistance de contre-réaction peut être différente dans les deux circuits 171 et 173, comme l'indiquent les notations différentes R_{f1} et R_{f2}. Ainsi le courant détecté par les récepteurs toriques R_1 et R_2 est converti en une tension et appliqué à un voltmètre (185 et 185'), tel que, par exemple, un détecteur sensible à la phase. Le voltmètre reçoit de préférence un signal d'entrée de référence provenant de la sortie de la logique 120 de sélection d'émetteur. En réponse au signal provenant du récepteur torique et du signal de référence d'émetteur, le voltmètre produit un signal de sortie qui indique l'amplitude et la phase du courant induit détecté par les récepteurs toriques. Le signal de sortie du voltmètre passe par un circuit de filtrage 187 et 187' respectivement qui élimine le bruit du signal. Les signaux en tension V_1 et V_2 résultant sont appliqués sélectivement à un circuit convertisseur analogique / numérique 190 au moyen d'un circuit multiplexeur 195. Le multiplexeur détermine quels signaux en tension (s'il en existe) sont délivrés au convertisseur analogique / numérique 190 en fonction de signaux de commande reçus du microprocesseur 200. Le convertisseur analogique / numérique 190 est couplé par sa bande de sortie au microprocesseur 200.

Le microprocesseur 200 détermine le courant radial s'écoulant dans la formation entre les récepteurs R_1 et R_2, en fonction du courant axial détecté par les deux récepteurs. Puisque le nombre de tours des enroulements toriques est connu, le

courant axial I_1 dans la bague d'outil à résistivité 150, au niveau du récepteur R_1, peut être calculé par :

$$I_1=\frac{V_{1n1}}{R_{f1}} \quad (1)$$

I_1 étant le courant axial dans la bague de l'outil à résistivité, au niveau du récepteur R_1 ;
V_1 étant la tension mesurée à R_1 ;
n_1 étant le nombre de tours dans l'enroulement torique R_1 ; et
R_{f1} étant la valeur de la résistance de contre-réaction dans le circuit courant / tension 171.

De même, le courant axial dans la bague 150 de l'outil à résistivité, au niveau du récepteur R_2 peut être calculé par :

$$I_2=\frac{V_2 n_2}{R_{f2}} \quad (2)$$

I_2 étant le courant axial dans la bague de l'outil à résistivité, au niveau du récepteur R_2 ;
V_2 étant la tension mesurée à R_2 ;
n_2 étant le nombre de tours dans l'enroulement torique R_2 ; et
R_{f2} étant la valeur de la résistance de contre-réaction dans le circuit courant / tension 173.

Dans le mode de réalisation préféré, chacun des émetteurs T_1, T_2 et T_3 est « activé » séquentiellement en activant le générateur 140 pour produire un courant dans un des émetteurs toriques. L'émetteur individuel à activer est de préférence sélectionner par le microprocesseur 200, qui transmet un signal codé à un multiplexeur 120, pour sélectionner quel l'émetteur coupler à la sortie du générateur 140. Le courant axial dans la bague de l'outil à résistivité est mesuré pour obtenir I_1 et I_2 à partir des récepteurs R_1 et R_2 respectivement. Le courant passant dans la formation entre les récepteurs peut être déterminé pour chaque émetteur en fonction de la différence de courant axial dans la bague 150 de l'outil à résistivité. Ainsi, le courant passant dans

la formation pour chaque émetteur, I_S peut être déterminé en soustrayant I_1 de I_2, de la façon suivante :

$$I_S = I_2 - I_1 \quad (3)$$

Une fois qu'est connu le courant s'écoulant dans la formation entre les récepteurs toriques R_1 et R_2, la résistivité de la formation peut être déterminée par le microprocesseur 200 pour chaque profondeur d'investigation (correspondant aux trois émetteurs différents) au moyen de la loi d'Ohm, de la façon suivante :

$$R = k\,(V_m / I_S) \quad (4)$$

R étant la résistivité de la formation pour la profondeur particulière d'investigation, V_m étant la tension mesurée, I_S le courant mesuré s'écoulant dans la formation entre les récepteurs toriques (c'est-à-dire la différence entre les courants mesurés à chaque récepteur) et k est une constante de l'outil dépendant de l'espacement des tores. En activant alternativement trois émetteurs, trois mesures différentes de résistivité peuvent être obtenues, à trois profondeurs différentes d'investigation.

La résistivité de la formation peut être mesurée en employant divers réseaux d'électrodes qui mesurent la tension V_m. Les diverses mesures de résistivité de la formation peuvent être obtenues par des électrodes multiples de capteurs afin de fournir des mesures complètes radialement de la résistivité de même que des mesures de résistivité à sensibilité dans l'azimut, afin de produire une image de la résistivité entourant le trou de forage. Ces mesures à sensibilité radiale et dans l'azimut peuvent être obtenues, comme le montre la figure 4, en prévoyant une ou plusieurs électrodes en anneau dans la bague 150 de l'outil à résistivité 100 pour mesurer la résistivité radiale, avec un réseau d'électrodes discrètes 125 pour obtenir des images de résistivité à sensibilité dans l'azimut. Selon une variante de réalisation représentée sur la figure 5, les mesures de résistivité à sensibilité radiale et dans l'azimut peuvent toutes deux être obtenues à partir d'un réseau d'électrodes discrètes.

En se référant d'abord au mode de réalisation exemplaire de la figure 4, une ou plusieurs électrodes en anneau sont prévues dans la bague 150 de l'outil à résistivité 100 dans une région proche des récepteurs toriques R_1 et R_2. Sur la figure 4, deux de ces électrodes 205a et 205b sont représentées entre les récepteurs toriques pour des raisons de symétrie et pour permettre d'effectuer la moyenne des mesures de tension obtenues à partir de chaque électrode en anneau. Si on le souhaite cependant, on peut utiliser une seule électrode et l'électrode en anneau peut être placée au-dessus ou au-dessous des récepteurs toriques, de même qu'entre ceux-ci. Comme le montre la figure 4, la ou les électrode(s) en anneau se connectent électriquement à un amplificateur 207 qui amplifie le signal en tension généré par l'électrode en anneau. L'amplificateur 207 se connecte à un voltmètre 215, qui comporte de préférence un détecteur sensible à la phase. Le voltmètre 215 reçoit également un signal de référence provenant de la logique 120 de sélection d'émetteur, représentant le signal émis par l'émetteur activé. Le voltmètre 215 produit un signal de sortie qui est filtré pour éliminer le bruit par le filtre 217 et appliqué en tant que signal en tension V_{ring} à une borne d'entrée du multiplexeur 195. Lorsqu'il est sélectionné par le microprocesseur 200, le signal en tension V_{ring} est fait passer au convertisseur A / N 190, dans lequel le signal est numérisé puis transmis au microprocesseur 200.

Le microprocesseur 200 détermine la résistivité radiale de la formation en fonction de la valeur de V_{ring} mesurée par la ou les électrodes en anneau, pour chacun des différents émetteurs. La formule utilisée par le microprocesseur 200 pour déterminer ces valeurs de résistivité R_j est basée sur l'équation (4) et s'énonce comme suit :

$$R_j = K_j \frac{V_{ring}}{I_{Sj}} \qquad (5)$$

j représentant la profondeur particulière d'investigation, correspondant à l'émetteur T_1, T_2 et T_3 ;

K_j représentant la valeur constante déterminée par l'espacement entre l'émetteur T_j et les récepteurs ;

V_{ring} étant la tension mesurée par l'électrode en anneau 205, pour une profondeur particulière d'investigation ; et

I_{sj} étant le courant radial calculé en mesurant le courant axial aux récepteurs R_1 et R_2 pour une profondeur particulière d'investigation.

Ainsi, dans le mode de réalisation de la figure 4, dans lequel trois émetteurs toriques sont prévus, trois mesures différentes de résistivité radiale sont obtenues, une pour chaque émetteur, représentant trois profondeurs différentes d'investigation.

En se référant toujours à la figure 4, l'outil à résistivité 100 comprend également de préférence une pluralité d'électrodes discrètes 125 espacées autour de la circonférence de la bague 150 de l'outil. Les électrodes discrètes sont constituées de préférence par une pièce de métal fixée à la paroi de la bague. Un matériau isolant approprié isole électriquement les électrodes discrètes de la bague conductrice. Dans le mode de réalisation préféré de la figure 4, les électrodes discrètes sont montées dans le même plan perpendiculaire à l'axe de la bague 150, au point milieu entre les récepteurs toriques R_1 et R_2. Les électrodes discrètes peuvent être configurées en une forme quelconque adéquate, telle que par exemple un disque circulaire ou une structure rectangulaire (comme le montre la figure 4). Selon le mode de réalisation préféré, chacune des électrodes discrètes est couplée à la logique 165 de sélection d'électrodes, qui peut par exemple être constituée par un circuit multiplexeur. La logique de sélection d'électrodes transmet sélectivement le signal en tension obtenu à une des électrodes discrètes pour une analyse supplémentaire par microprocesseur 200. Le signal en tension sélectionné est appliqué à un amplificateur 167 qui amplifie le signal avant qu'il soit appliqué à un voltmètre 155. Le voltmètre 155 comprend de préférence un détecteur sensible à la phase. Le voltmètre 155 reçoit également un signal de référence de la logique 120 de sélection d'émetteur, représentant le signal transmis par l'émetteur activé. Le voltmètre 155 produit un signal de sortie qui est filtré pour retirer le bruit au moyen du filtre 157 et qui est appliqué en tant que signal en tension V_{ei} à une borne d'entrée du multiplexeur 195. Lorsqu'il est sélectionné par le microprocesseur 200, le signal en tension V_{ei} est délivré au convertisseur A / N 190, dans lequel le signal est numérisé puis transmis au microprocesseur 200.

A partir de la tension V_{ei} mesurée à chacune des électrodes discrètes, le microprocesseur 200 détermine une mesure à sensibilité dans l'azimut de la

résistivité de la formation (R_e) pour chaque profondeur d'investigation j, de la façon suivante :

$$R_{ej}=K_j\frac{V_{ej}}{I_{sj}} \quad (6)$$

j représentant la profondeur particulière d'investigation, correspondant à l'émetteur T_1, T_2 et T_3 ;

K_j représentant la valeur constante qui est déterminée par l'espacement entre l'émetteur T_j et les récepteurs ;

V_e étant la tension mesurée par l'électrode discrète, pour une profondeur particulière d'investigation ; et

I_{sj} étant le courant radial calculé en mesurant le courant axial aux récepteurs R_1 et R_2, pour une profondeur particulière d'investigation.

Comme le montre la figure 4, le microprocesseur 200 est couplé à une interface de communication 250. Périodiquement, le microprocesseur 200 peut transmettre certaines informations sélectionnées, telles que des valeurs de résistivité, à l'interface de communication 250. L'interface de communication 250 peut alors transmettre périodiquement ces informations à la surface par un moyen quelconque adéquat, y compris des impulsions de pression dans la boue de forage.

En se référant maintenant à la figure 5, les résistivités à sensibilité radiale et dans l'azimut peuvent toutes deux être déterminées en employant un réseau d'électrodes discrètes 500. Dans ce mode de réalisation, la ou les électrodes en anneau de la figure 4 peuvent être éliminées si un nombre suffisant d'électrodes discrètes est prévu. Comme c'était le cas pour le mode de réalisation de la figure 4, les électrodes discrètes sont placées autour de la circonférence de l'outil de forage et des valeurs de résistivité à sensibilité dans l'azimut sont déterminées pour chacune des électrodes discrètes en utilisant en utilisant l'équation (6).

Si le nombre d'électrodes en bouton est suffisant (par exemple huit ou davantage d'électrodes discrètes sont prévues), une mesure de résistivité radiale peut être obtenue à partir des électrodes discrètes de la figure 5, sans électrode en anneau, en

effectuant une sommation des tensions de toutes les électrodes discrètes pour obtenir une tension radiale (V_{radial}) :

$$V_{radial} \cong \sum_{i=1}^{N} V_{ei} \tag{7}$$

N représentant le nombre d'électrodes discrètes. La résistivité radiale pouvant être mesurée pour chaque profondeur d'investigation s'énonce comme suit :

$$R_j = K_j \frac{V_{radial}}{I_{sj}} \tag{8}$$

En effectuant une corrélation des mesures de résistivité réalisées par les électrodes en bouton et par les capteurs directionnels prévus dans l'outil d'enregistrement, une image de la formation entourant le trou de forage peut être obtenue, indépendamment du fait que l'outil à résistivité soit rotatif ou non.

La description ci-dessus suppose que chacune des électrodes discrètes soient mesurées séquentiellement. En variante, chaque électrode discrète peut être couplée à un circuit de détection séparé, de sorte que les tensions à chaque électrode soient mesurées simultanément.

Comme on l'a décrit en relation avec les divers modes de réalisation des figures 4 et 5, diverses dispositions, configurations et quantités d'électrodes discrètes peuvent être utilisées. Ainsi, par exemple, comme le montre la figure 6A, huit électrodes 125a à 125h peuvent être prévues espacées de 45° autour de la bague 150. La figure 6B montre une variante de disposition avec seulement trois électrodes 125a' à 125c' espacées à 120° autour de la bague 150. Ainsi, la présente invention considère que plusieurs électrodes discrètes sont espacées autour de la circonférence du trou de forage, sans nécessiter un quelconque nombre spécifique d'électrodes.

Suivant le mode de réalisation préféré, la résistivité de la formation entre la face de la tête de forage 32 et les récepteurs R_1 et R_2 peut également être déterminée et utilisée en tant qu'indication à l'avance d'une limite de gisement. De préférence, le récepteur torique inférieur R2 surveille la variation du courant s'écoulant dans la formation à

travers le trépan, suivant des techniques connues. Ainsi, lorsque la tête de forage pénètre dans une formation plus conductrice, la quantité de courant s'écoulant du trépan dans la formation augmente. Cette fuite de courant dans la formation à travers la tête de forage peut être mesurée par le récepteur R2.

En se référant maintenant à la figure 8, une variante de réalisation de la présente invention configure les électrodes discrètes selon une orientation en enregistrement latéral afin de focaliser un courant dans la formation. Ce type de conception d'électrode peut être utilisé à la place de l'électrode métallique simple décrite plus haut, en relation avec les électrodes discrètes des figures 4 et 5. Ainsi, dans des situations dans lesquelles davantage de focalisation est nécessaire, les électrodes de la figure 7 peuvent être utilisées à la place des électrodes discrètes des modes de réalisation des figures 4 et 5.

Comme le montre la figure 8, l'électrode discrète 325 est constituée par un disque généralement circulaire comprenant deux anneaux conducteurs M_1 et M_2 et un disque conducteur centrale A_0. Les anneaux M_1 et M_2 et le disque A_0 peuvent être fabriqués en un métal ou matériau semi-conducteur adéquat quelconque. Les anneaux et disques conducteurs sont séparés par un matériau isolant 322, 324. Le matériau isolant 322 forme un anneau concentrique autour du disque conducteur A_0. Selon le mode de réalisation de la figure 8, l'anneau conducteur M_1 forme un anneau concentrique autour de l'anneau isolant 322. Le matériau isolant 324 forme un anneau concentrique autour de l'anneau conducteur M_1. L'autre anneau conducteur M_2 forme un anneau concentrique autour de l'anneau isolant 324. La structure de l'électrode tout entière est montée sur une section de bague de forage grâce à une couche isolante généralement circulaire 327. Bien que l'électrode 325 soit représentée comme formant une structure circulaire sur la figure 8, on doit comprendre que d'autres structures et configurations peuvent être utilisées de la même façon pour une orientation d'enregistrement latéral.

En fonctionnement, les anneaux conducteurs M_1 et M_2 sont maintenus au même potentiel, en focalisant ainsi un courant à travers le disque conducteur A_0. Selon le mode de réalisation de la figure 8, le potentiel aux anneaux conducteurs M_1 et M_2 est

maintenu le même en changeant le courant I_1 émis depuis l'anneau conducteur A_1. Ainsi, des voltmètres sont couplés aux anneaux conducteurs M_1 et M_2 et les sorties des voltmètres sont comparées et appliquées à une boucle de contre-réaction pour commander le courant émis à partir de l'anneau conducteur A_0. La variation en courant peut être obtenue en utilisant un générateur de courant variable, par exemple. D'autres techniques, telles qu'une focalisation numérique, sont possibles et peuvent être utilisées avec l'électrode représentée sur la figure 8 sans quitter les principes de la présente invention. Voir par exemple « Scale Modeling of the Laterolog Using Synthetic Focusing Methods » de Shattuck, Bittar et Shen, « The Log Analyst », juillet août 1987.

En mesurant la tension (V_{M1}) en M_1 et le courant (I_0) émis par le disque conducteur A_0, la résistivité R_e de la formation dans la direction de l'azimut de l'électrode 325 peut être déterminée par :

$$R_e = \frac{V_{M1}}{I_o} \tag{9}$$

Comme décrit plus haut avec référence aux figures 4, 5, 6A et 6B, une pluralité d'électrodes peut être prévue autour de la circonférence de l'outil pour permettre une imagerie de la formation.

Dans le mode de réalisation préféré, l'outil à résistivité 100 est calibré avant emploi dans un système EPF. Ce calibrage détermine la constante k utilisée pour les mesures de résistivité. Cette valeur est de préférence mémorisée dans le microprocesseur 200 pour des calculs ultérieurs de résistivité.

La description qui précède est considérée comme étant purement illustrative des principes de la présente invention. De nombreuses variantes et modifications apparaîtront à l'homme de l'art, une fois la description qui précède appréciée dans sa totalité. On considère que les revendications suivantes englobent toutes ces variantes et modifications.

REVENDICATIONS

1. Outil d'enregistrement à résistivité (100) comportant :
   - une bague ;
   - un réseau d'émetteurs comprenant une pluralité d'émetteurs (T_1, T_2, T_3) montés sur ladite bague ;
   - un réseau de récepteurs comprenant au moins un premier et un deuxième récepteurs (R_1, R_2) espacés sur ladite bague ;
   - une pluralité d'électrodes discrètes (125) espacées autour de la circonférence de la bague ; et
   - un microprocesseur (200) couplé auxdits émetteurs, auxdits récepteurs et auxdites électrodes discrètes, le microprocesseur :
   - sélectionnant un émetteur à actionner, en induisant ainsi un courant dans la bague ;
   - recevant un premier signal du premier récepteur et un deuxième signal du deuxième récepteur qui indiquent la quantité de courant s'écoulant dans la bague au-delà des premier et deuxième récepteurs, respectivement et, à partir desdits premier et deuxième signaux, déterminant la quantité de courant s'écoulant dans la formation entre les premier et les deuxième récepteurs ; et
   - recevant un signal de chacune des électrodes discrètes de la pluralité, indiquant le niveau de tension à chaque électrode et, en fonction desdits niveaux de tension, déterminant une lecture de résistivité à sensibilité dans l'azimut pour chaque électrode discrète.

2. Outil d'enregistrement à résistivité selon la revendication 1, dans lequel ladite pluralité d'électrodes discrètes est espacée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la bague.

3. Outil d'enregistrement à résistivité selon la revendication 1, dans lequel le microprocesseur (200) génère une image de la résistivité de la formation en fonction des lectures de résistivité à sensibilité dans l'azimut de chaque électrode.

4. Outil d'enregistrement à résistivité selon la revendication 1, dans lequel ledit réseau d'émetteurs comprend trois émetteurs s'étendant asymétriquement sur un côté du réseau de récepteurs, et dans lequel chacun desdits émetteurs est constitué par un tore monté sur ladite bague, ledit tore comprenant un noyau magnétique et un enroulement conducteur.

5. Outil d'enregistrement à résistivité selon la revendication 4, dans lequel chacun desdits récepteurs est constitué par un tore monté sur ladite bague, ledit tore comprenant un noyau magnétique et un enroulement conducteur.

6. Outil à résistivité selon la revendication 1, dans lequel ledit microprocesseur effectue la somme des niveaux de tension de chaque électrode discrète et détermine une mesure de résistivité radiale en fonction des niveaux de tension additionnés et de la quantité de courant s'écoulant dans la formation entre les premier et deuxième récepteurs.

7. Outil à résistivité selon la revendication 1, comportant en outre au moins une électrode en anneau montée sur ladite bague au voisinage desdits récepteurs, dans lequel ledit microprocesseur est couplé à ladite électrode en anneau et reçoit un signal de ladite électrode en anneau indiquant le niveau de tension à ladite électrode en anneau et dans lequel ledit microprocesseur détermine une mesure de résistivité radiale en fonction du niveau de tension à ladite électrode en anneau et de la quantité de courant s'écoulant dans la formation entre les premier et deuxième récepteurs.

8. Outil à résistivité selon la revendication 1, dans lequel lesdites électrodes discrètes sont constituées par un disque conducteur et par deux anneaux conducteurs concentriques et dans lequel ledit microprocesseur maintient au même potentiel lesdits anneaux concentriques en faisant varier le courant émis par ledit disque conducteur.

9. Outil à résistivité selon la revendication 8, dans lequel ledit microprocesseur détermine une lecture de résistivité à sensibilité dans l'azimut en fonction de la tension à un desdits anneaux concentriques et du courant émis par ledit disque.

10. Outil à résistivité selon la revendication 2, dans lequel chacun desdits émetteurs est activé séquentiellement par ledit microprocesseur afin d'obtenir des lectures de résistivité pour des profondeurs multiples d'investigation.

11. Outil à résistivité selon la revendication 10, dans lequel lesdits émetteurs sont espacés et équidistants.

12. Outil à résistivité selon la revendication 10, dans lequel ladite pluralité d'électrodes discrètes est disposée entre lesdits récepteurs.

13. Outil à résistivité selon la revendication 7, dans lequel ladite pluralité d'électrodes discrètes comprend au moins trois électrodes.

14. Outil à résistivité selon la revendication 13, dans lequel lesdites électrodes discrètes sont espacées de façon équidistante autour du périmètre de la bague.

15. Outil à résistivité selon la revendication 6, dans lequel ladite pluralité d'électrodes discrètes comprend au moins huit électrodes.

16. Outil d'enregistrement pendant le forage qui mesure la résistivité d'une formation à travers laquelle un trou de forage a été foré, comprenant :
    - une tête de forage ;
    - une bague ;
    - un réseau d'émetteurs montés sur la bague, qui comprend une pluralité d'émetteurs toriques capables d'induire un courant dans la bague s'écoulant à travers une partie de la bague et dans la formation entourant le trou de forage ;

- un réseau de récepteurs comprenant deux récepteurs pour mesurer le courant s'écoulant dans la formation entre les récepteurs en fonction de la différence en courant axial détectée par les deux récepteurs ; et
- un réseau d'électrodes discrètes disposées entre le réseau de récepteurs, lesdites électrodes en bouton étant espacées de façon équidistante autour du périmètre de la bague afin de fournir une image de la résistivité du trou de forage.

17. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 16, comportant en outre des circuits pour mesurer la tension à chacune des électrodes discrètes.

18. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 16, dans lequel les électrodes discrètes sont disposées dans une orientation d'enregistrement latéral pour focaliser un courant dans la formation.

19. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 17, comportant en outre un microprocesseur couplé auxdits circuits de mesure, ledit microprocesseur servant à calculer la résistivité de la formation en fonction du courant s'écoulant dans la formation entre les récepteurs et de la tension mesurée à chaque électrode discrète.

20. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 19, dans lequel ledit microprocesseur effectue la somme des niveaux de tension provenant de chaque électrode discrète afin d'obtenir une lecture de résistivité radiale et analyse indépendamment les niveaux de tension provenant de chaque électrode discrète pour obtenir des lectures de résistivité à sensibilité dans l'azimut.

21. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 16, dans lequel au moins un desdits récepteurs mesure la résistivité au niveau de la tête de forage.

22. Outil d'enregistrement pendant le forage qui mesure la résistivité d'une formation à travers laquelle un trou de forage a été foré, comportant :

- un réseau d'émetteurs comprenant une pluralité d'émetteurs capables d'émettre des signaux électromagnétiques dans la formation ;
- un réseau de récepteurs comprenant au moins deux récepteurs et des circuits associés, qui mesure l'amplitude et la phase des signaux électromagnétiques émis dans la formation entre les deux récepteurs ; et
- une pluralité d'électrodes espacées autour de la circonférence de l'outil d'enregistrement pendant le forage, celles-ci étant dotées de circuits associés qui mesurent le niveau de tension à chaque électrode.

23. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 22, dans lequel la pluralité d'électrodes est disposée dans le même plan.

24. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 23, dans lequel la pluralité d'électrodes comprend au moins trois électrodes.

25. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 24, dans lequel la pluralité d'électrodes comprend au moins huit électrodes.

26. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 25, dans lequel les électrodes sont disposées dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'outil.

27. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 22, comportant en outre un générateur couplé sélectivement à un desdits émetteurs pour faire en sorte que ledit émetteur génère des signaux électromagnétique durant une période de mesures.

28. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 27, dans lequel les circuits associés audit réseau de récepteurs et à ladite pluralité d'électrodes comprennent un voltmètre.

29. Outil d'enregistrement pendant le forage selon la revendication 22, comportant en outre au moins une électrode en anneau disposée au voisinage dudit réseau de récepteurs pour mesurer le niveau de tension au voisinage du réseau de

récepteurs afin de fournir des informations concernant la résistivité de la formation.

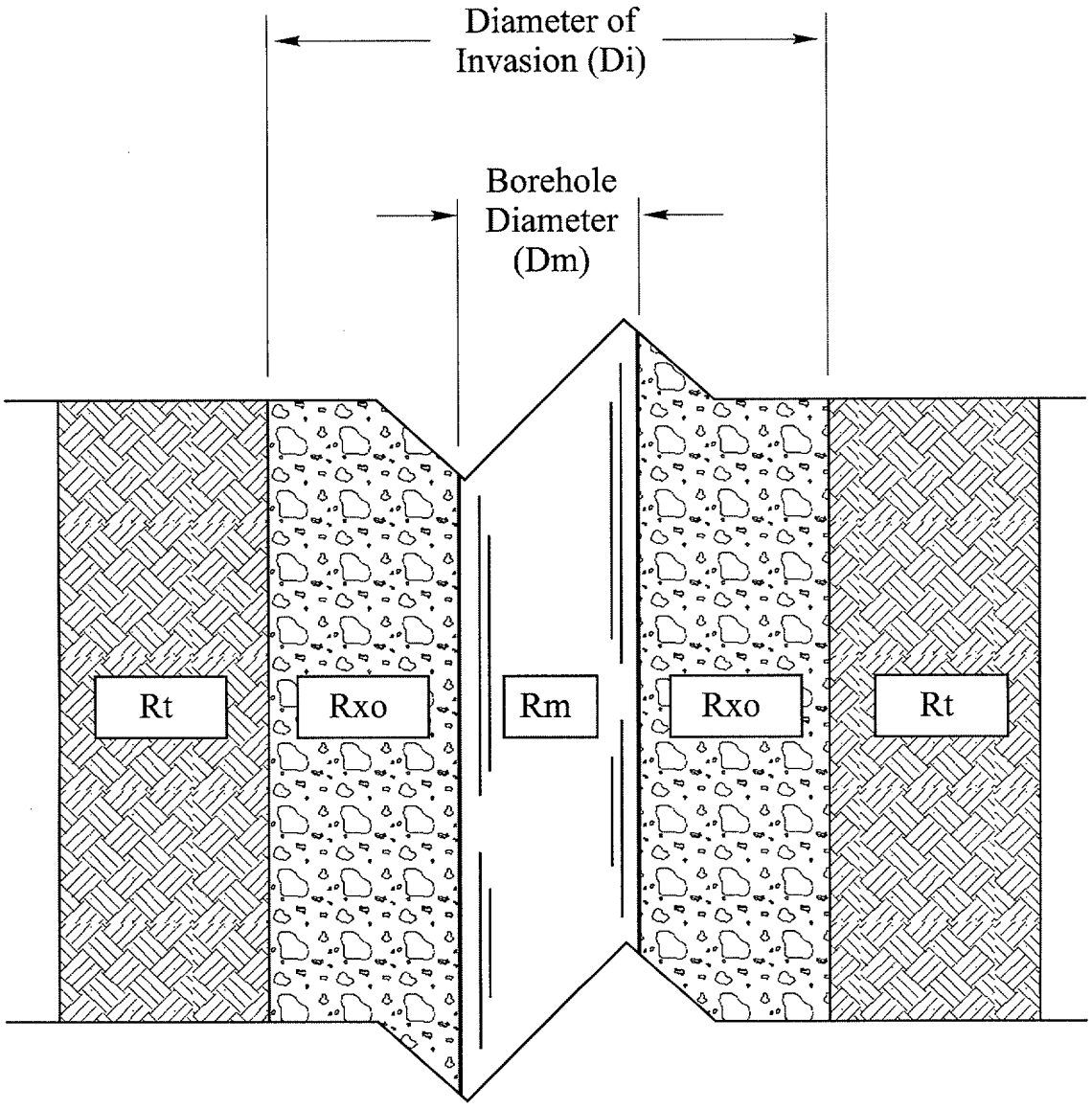

Diameter of
Invasion (Di)
Borehole
Diameter
(Dm)
Rt
Rxo
Rm
Rxo
Rt

FIG 1

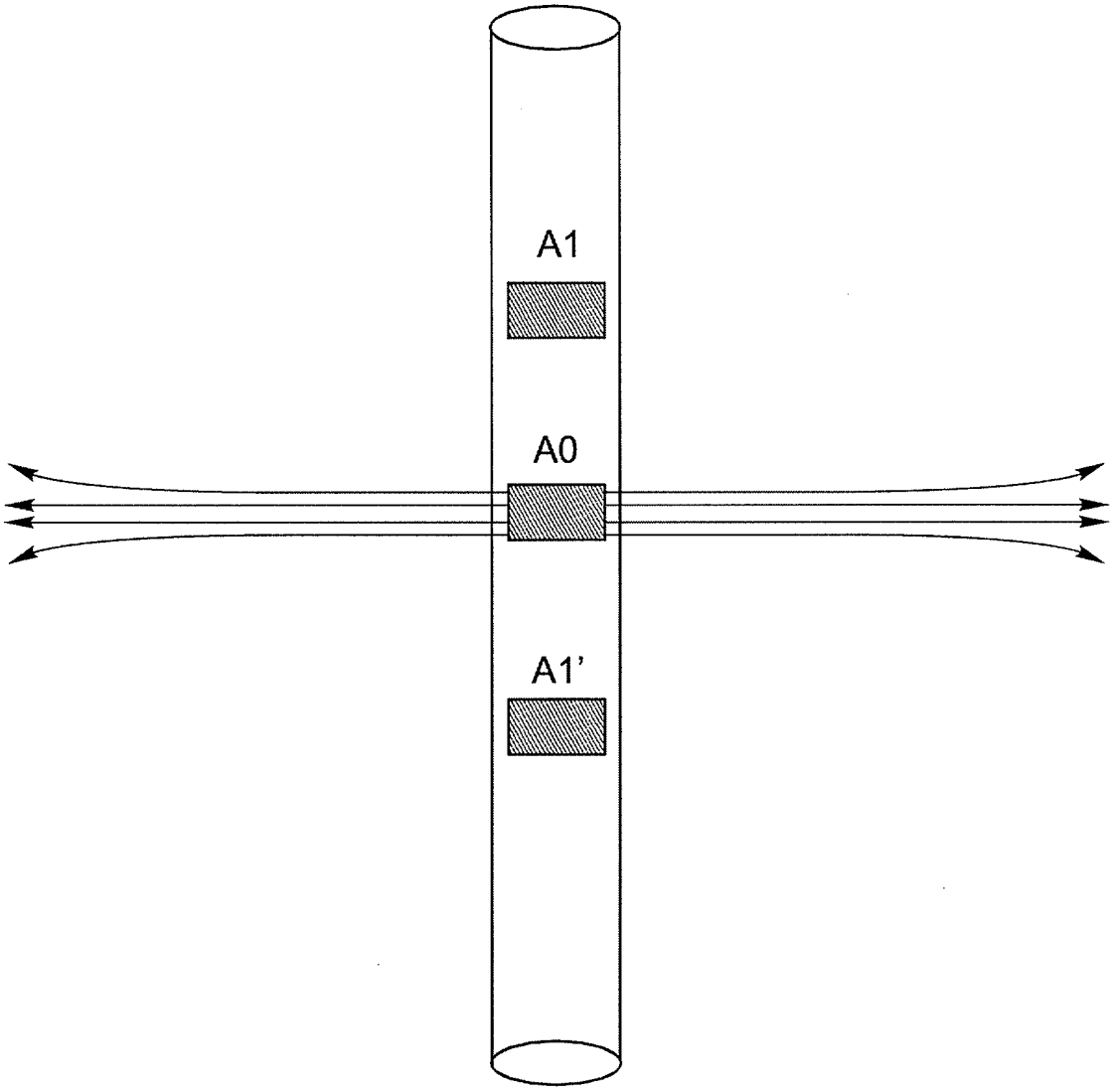


FIG 2
Prior Art

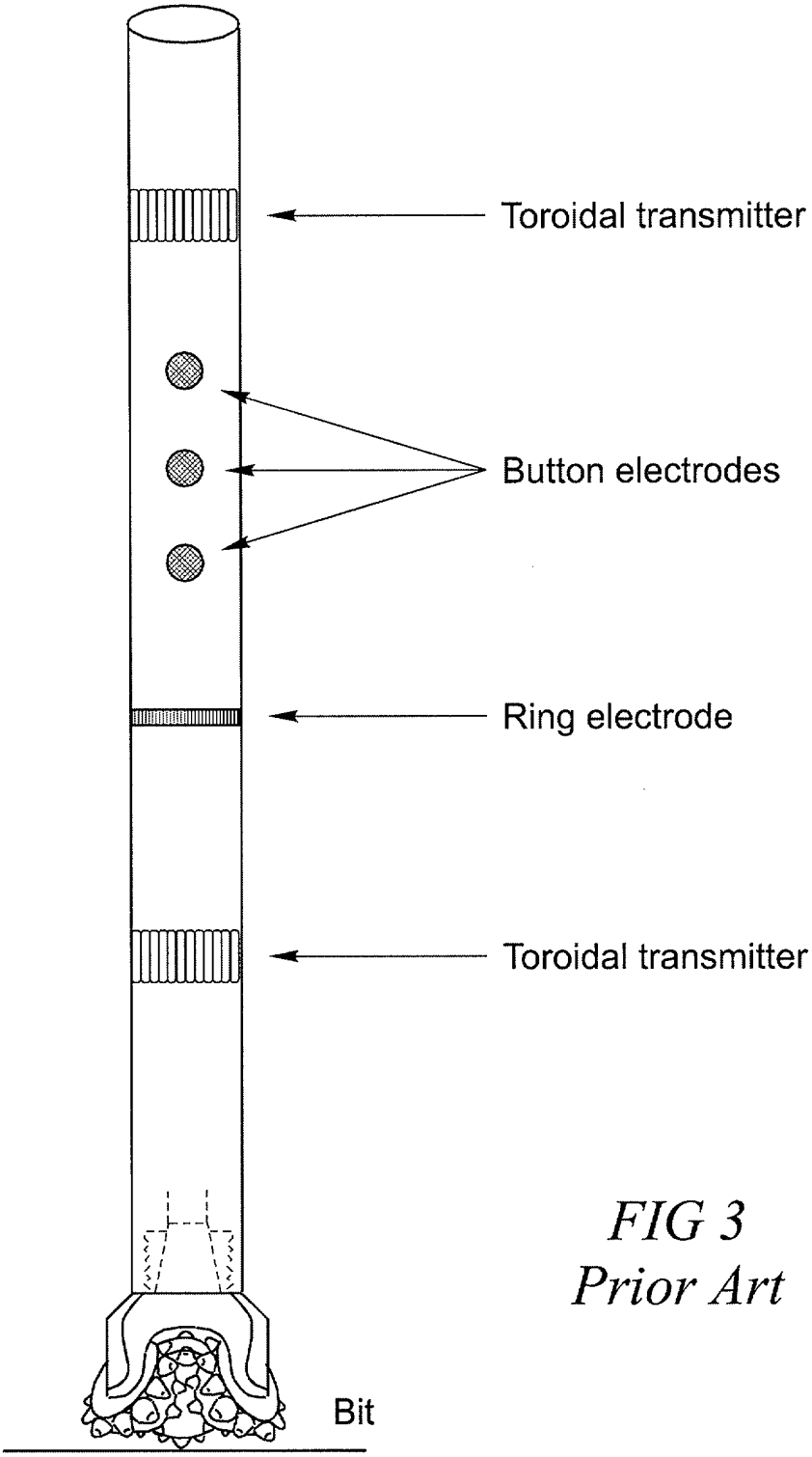


FIG 3
Prior Art

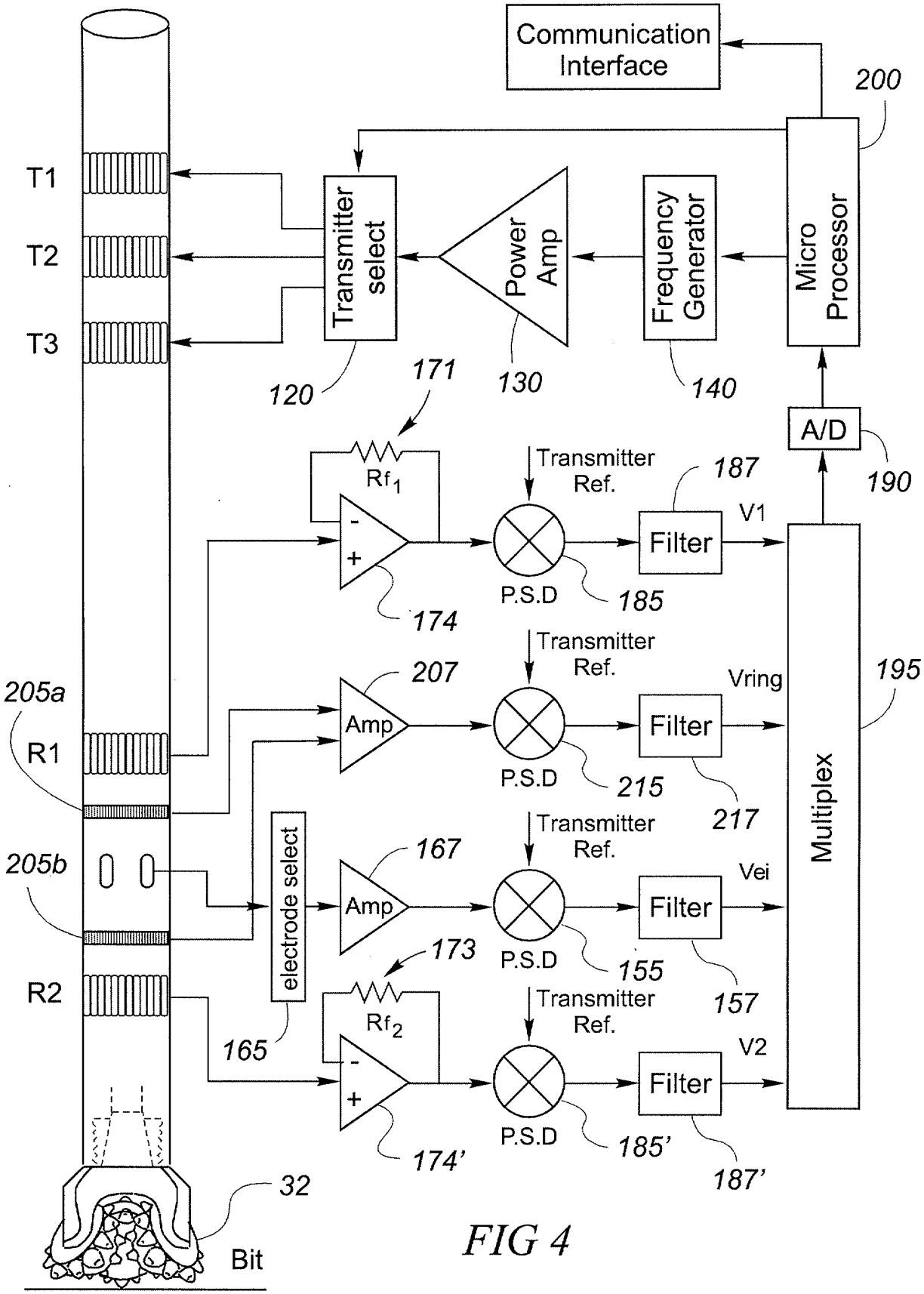

Communication Interface
200
T1
T2
T3
Transmitter select
Power Amp
Frequency Generator
Micro Processor
120
130
140
171
A/D
190
Rf1
Transmitter Ref.
187
V1
Filter
P.S.D
185
174
205a
R1
207
Amp
Vring
195
Multiplex
215
217
205b
electrode select
167
Vei
155
157
173
R2
Rf2
165
V2
174'
185'
187'
32
Bit

FIG 4

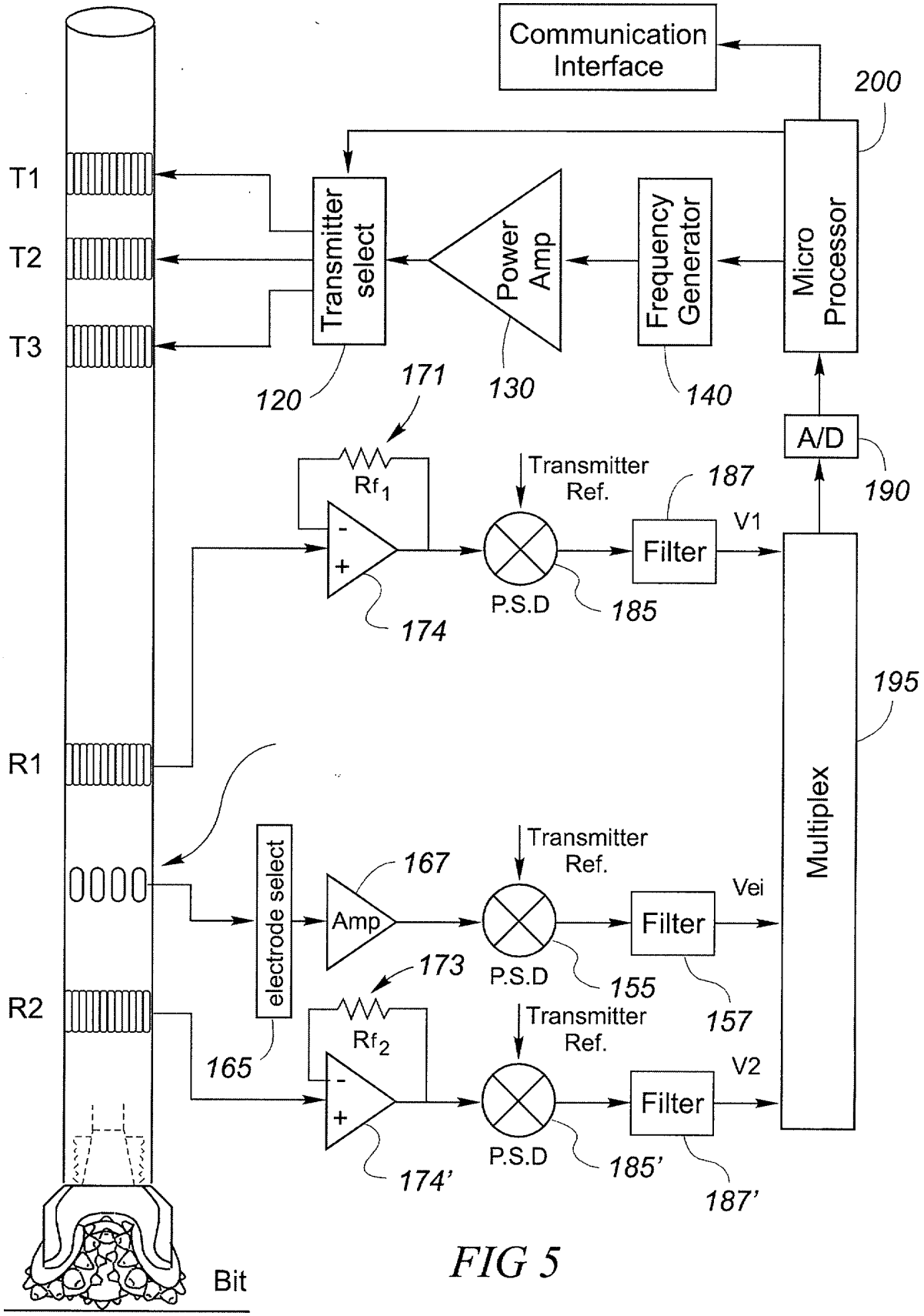

Communication Interface
200
T1
T2
T3
Transmitter select
Power Amp
Frequency Generator
Micro Processor
120
130
140
171
A/D
190
Rf1
Transmitter Ref.
187
V1
Filter
P.S.D
185
174
195
R1
Multiplex
electrode select
Amp
167
Transmitter Ref.
Vei
Filter
P.S.D
155
157
173
R2
Rf2
Transmitter Ref.
V2
165
Filter
P.S.D
185'
174'
187'
Bit

FIG 5

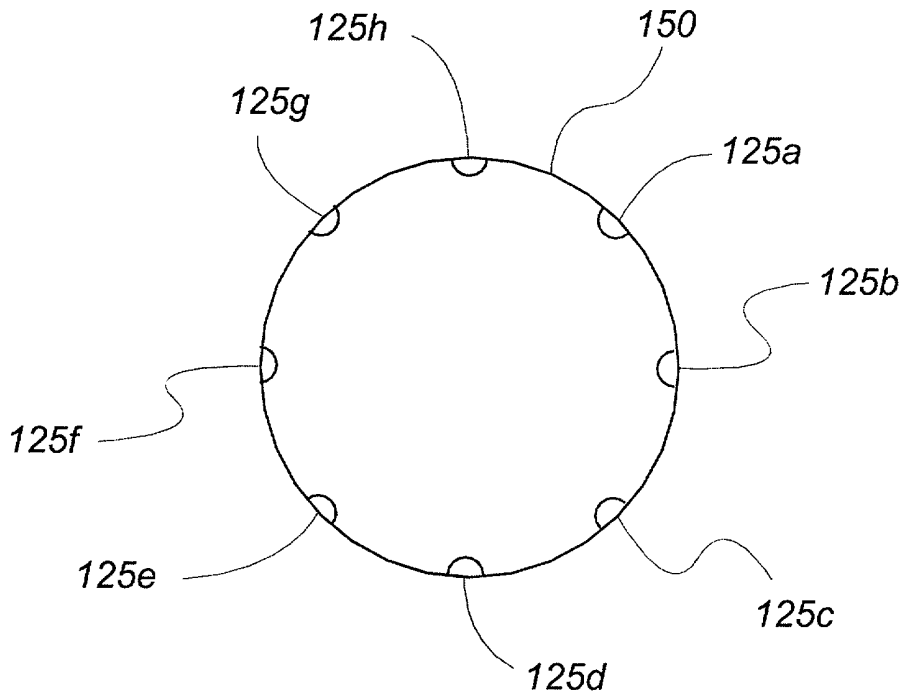

125h
150
125g
125a
125b
125f
125e
125c
125d

FIG 6a

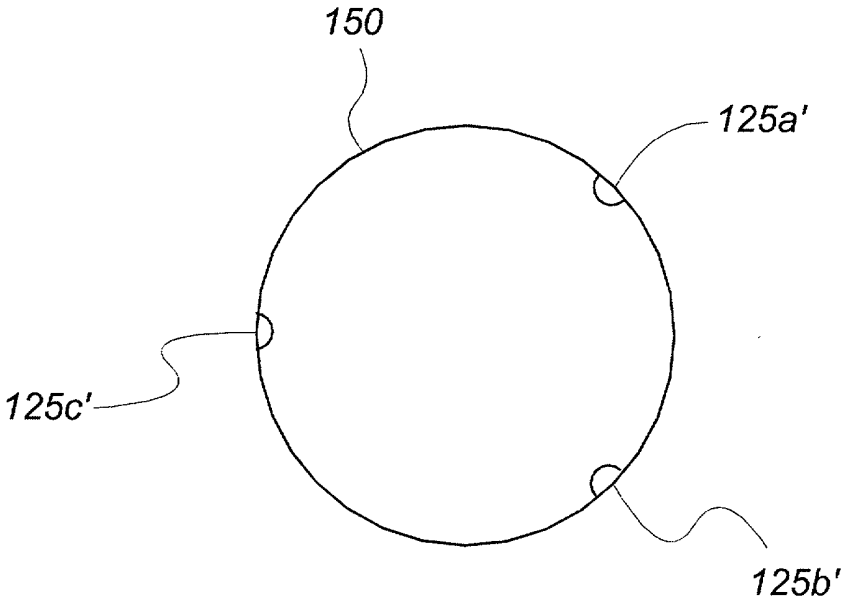
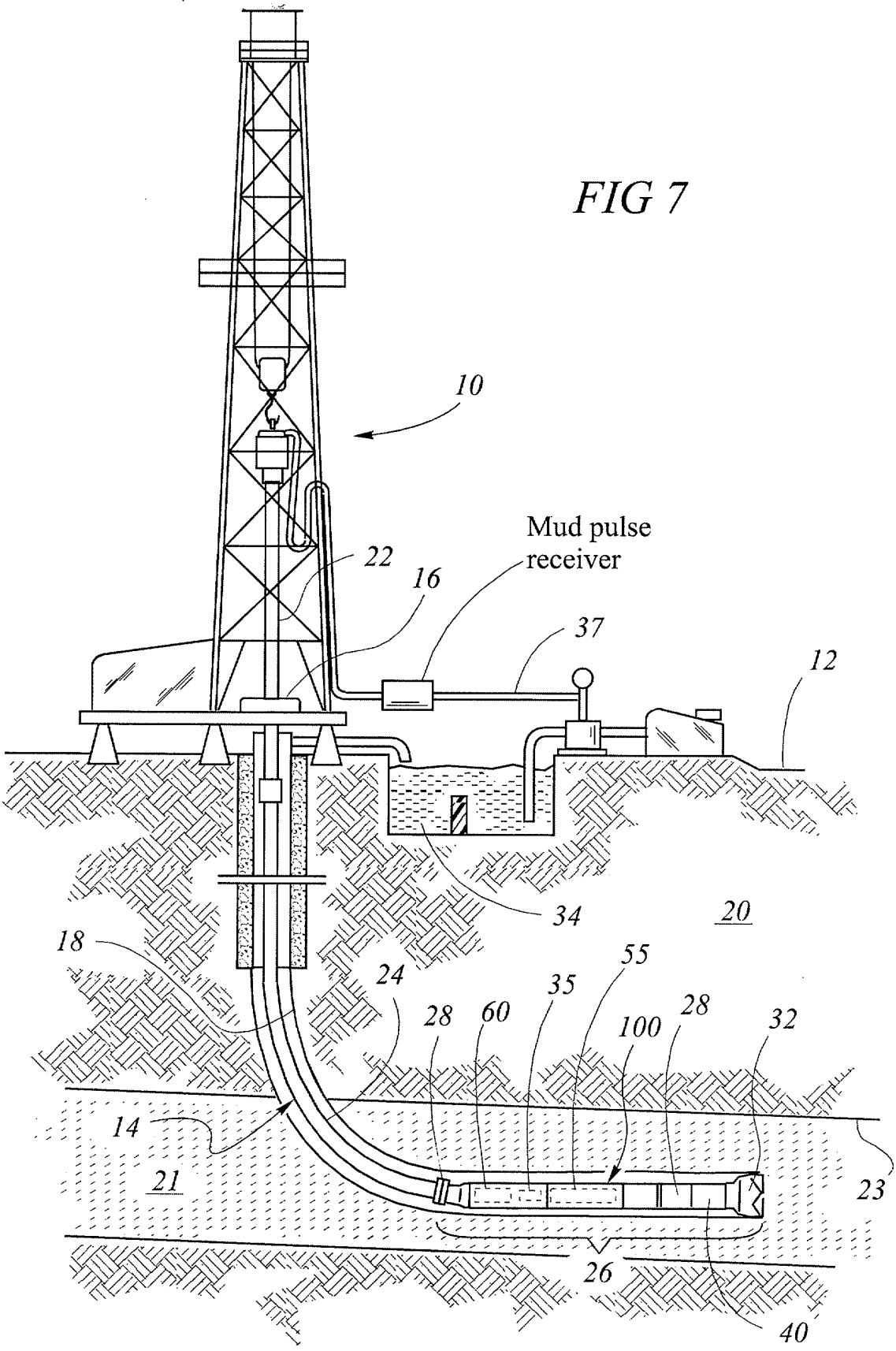

150
125a'
125c'
125b'

FIG 6b

FIG 7


10
Mud pulse
receiver
22
16
37
12
34
20
18
24
55
35
28
60
100
28
32
14
21
23
26
40

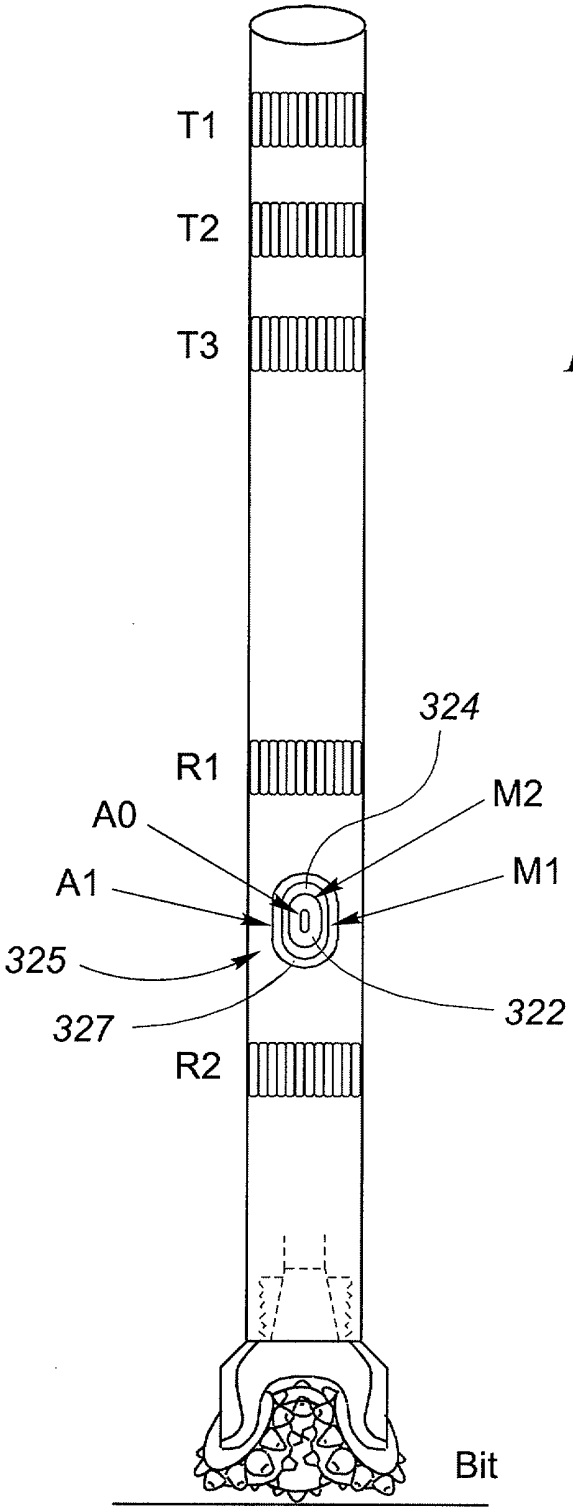


FIG 8