



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 356 087**

51 Int. Cl.:
H01Q 9/42 (2006.01)
H01Q 1/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05300192 .1**
96 Fecha de presentación : **17.03.2005**
97 Número de publicación de la solicitud: **1594186**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.11.2005**

54 Título: **Antena de suelo con bucle que radia ondas kilométricas o hectométricas.**

30 Prioridad: **04.05.2004 FR 04 04860**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
04.04.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
04.04.2011

73 Titular/es: **TDF**
10, rue d'Oradour-sur-Glane
75015 Paris, FR

72 Inventor/es: **Piole, Philippe**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 356 087 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

La presente invención se refiere especialmente a una antena para emitir en una banda de frecuencia larga o media comprendida entre 10 kHz aproximadamente y 3 MHz aproximadamente, o sea en ondas kilométricas o hectométricas, por ejemplo para la difusión de programa radiofónico digital.

Actualmente, postes radiantes aislados de muy gran altura del orden de 20 a 350 metros, están instalados generalmente lejos de las ciudades para emitir señales en la banda de las ondas hectométricas con una potencia de emisión relativamente elevada. Si se desea instalar un poste radiante en la proximidad de una aglomeración o en ciudad, debe estar disponible un importante perímetro de seguridad para erigir el poste radiante e instalar la red de tierra de cable asociada al poste y colocada sobre el suelo o a una pequeña profundidad en el interior del suelo.

Sin embargo, el futuro de los grandes postes radiantes en la proximidad de las ciudades o en el interior de éstas es comprometido por razones de compatibilidad electromagnética. Los acoplamientos entre la parte erigida del poste y las diversas estructuras metálicas que pueden estar situadas en la proximidad del poste, tales como armaduras metálicas en los edificios, farolas metálicas y postes de líneas de transporte de energía eléctrica constituyen fuentes de corrientes inducidas, difícilmente aceptables por las administraciones que autorizan la instalación de antenas.

Además del aspecto inestético de los grandes postes radiantes, el contexto de exposición del público al campo electromagnético emitido por los grandes postes radiantes necesita obtener un terreno relativamente vasto para el emplazamiento de cada poste. Todos estos inconvenientes son otros tantos obstáculos para la instalación de un poste radiante en zona urbana.

Por consiguiente, puesto que un gran poste radiante es visible desde lejos, y por tanto no se integra en el paisaje urbano y genera esencialmente un campo de onda de espacio que es una fuente de acoplamiento con los edificios y construcciones erigidas en su proximidad, la mayoría de los postes radiantes están instalados fuera de las aglomeraciones. Así, un poste radiante de programas radiofónicos está instalado fuera de una ciudad, y por tanto muy alejado de los receptores de los oyentes, lo que le impide ser eficaz con pequeñas potencias de emisión.

La patente US 2746040 se refiere a una antena omnidireccional en emisión o en recepción de banda de frecuencia ancha del orden de 100 MHz y por tanto en ondas métricas, siendo utilizable la antena, también, con bajas frecuencias por dimensionamiento apropiado. La antena puede estar montada en un avión o en el suelo y comprende conductores radiales coplanarios por encima de una masa, en los cuales unas extremidades están conectadas a un anillo concéntrico conductor exterior y otras extremidades están unidas a conductores verticales para generadores de radiofrecuencia. Conductores de masa, que pueden estar enterrados en el suelo, están unidos a los generadores por hilos conductores verticales de alimentación. Los generadores aseguran una distribución uniforme de potencia con el fin de que la antena radie una onda de espacio cilíndrica entre la superficie del anillo de conductores y los conductores de masa. Esta antena no radia ninguna onda de suelo.

La patente US 6542126 B2 se refiere a una antena que comprende una placa de masa, y un elemento radiante plano dispuesto paralelamente y a una distancia constante de la placa. El elemento radiante es en forma de C, es decir en bucle abierto rectangular, unido por un elemento de unión a la placa de masa. La otra extremidad del bucle abierto está unida a la placa de masa a través de un conmutador que cuando está cerrado hace la función de cortocircuito para aumentar la frecuencia de resonancia. La antena está destinada a un móvil bibanda de tipo GSM 900/1800 y no es una antena de suelo radiante de ondas de suelo.

La presente invención tiene por objetivo facilitar una antena de suelo que esté destinada a radiar en ondas sensiblemente kilométricas o hectométricas, que sea menos cara y no ofrezca las limitaciones precedentes, en particular que sea casi invisible desde su entorno inmediato y se integre bien en el paisaje y que favorezca la propagación de una onda de suelo.

Para lograr este objetivo, una antena de suelo, que comprende un plano de masa, un bucle de excitación metálico abierto entre dos extremidades y que se extiende sensiblemente paralelo al plano de masa, y un elemento de unión metálico sensiblemente perpendicular al bucle y que une una de las extremidades del bucle de excitación al plano de masa, está caracterizada porque, para radiar una onda de suelo kilométrica o hectométrica, el plano de masa está enterrado sensiblemente horizontal en la proximidad y debajo de la superficie del suelo, el bucle de excitación se extiende sensiblemente horizontal por encima de la superficie del suelo a una altura superior a 2 m aproximadamente con respecto al plano de masa y el bucle de excitación y el elemento de unión están constituidos, cada uno, por al menos un elemento cilíndrico delgado.

La discontinuidad entre el aire y el suelo, situada sobre y en el interior del suelo en la periferia de la antena, entre el par suelo y plano de masa metálico, por una parte, y el suelo sin el plano de masa metálico, por otra, favorece únicamente la propagación de una onda de suelo omnidireccional en polarización vertical. La abertura del bucle de excitación es muy pequeña con respecto a la longitud del bucle, en una relación de 1/50 aproximadamente a 1/100 aproximadamente, para eliminar sensiblemente cualquier componente de campo eléctrico horizontal en la superficie del suelo. La onda de suelo es debida a la inyección de corrientes elevadas en el suelo, consecuencia de una baja resistencia óhmica de la antena, sin ninguna radiación lateral de una onda de espacio en comparación con una antena de poste, explotando la antena un modo de radiación magnética y no eléctrica para ondas sensiblemente kilométricas o hectométricas. Contrariamente a emisiones en modulación de frecuencia, la onda de suelo, y no una onda de espacio, transporta una señal útil digital o analógica hacia los receptores. La casi ausencia de componente de onda de espacio sobre la superficie del suelo resuelve ventajosamente problemas de compatibilidad electromagnética y de exposición de las personas, y de acoplamientos de la antena con estructuras próximas a la antena por encima del suelo.

Sin embargo, como se verá en lo que sigue, una onda de espacio explotable particularmente para difusiones ionosféricas nocturnas de un alcance más grande, a partir de aproximadamente una treintena de kilómetros, es generada por la antena de la invención en dirección a un eje cenital central de la antena.

Gracias al plano de masa enterrado en el suelo a algunas decenas de centímetros y al bucle de excitación suspendido de 1 a 3 metros aproximadamente por encima del suelo, la antena de suelo de acuerdo con la invención es muy discreta y así insensible a cualquier viento violento, chorro de aire, rayo, seísmo o explosión. La antena no presenta casi superficie eco-radar (SER).

La antena comprende igualmente un medio de alimentación de potencia que tiene bornes unidos respectivamente al bucle de excitación y al plano de masa a una distancia del elemento de unión a lo largo del bucle de excitación tal que la impedancia del bucle de excitación llevada desde el elemento de unión sea sensiblemente igual a la impedancia característica del medio de alimentación de potencia de manera que la antena se adapte a la impedancia característica del medio de alimentación de potencia. La debilidad de la radiación en onda de espacio a nivel del suelo permite aumentar la potencia del medio de alimentación para aumentar la potencia radiada en onda de suelo por la antena, al tiempo que se respetan las reglamentaciones actuales en materia de propagación de onda de espacio.

Con el fin de confinar la radiación de la antena de suelo según al menos una dirección y así conferir una directividad a la antena, un medio, tal como fosas en el suelo y/o protuberancias sobre el suelo que pueden ser al menos parcialmente metálicas, está colocado sensiblemente en la periferia del plano de masa y en la proximidad del suelo para confinar la radiación electromagnética de la antena respectivamente según al menos una dirección predeterminada a lo largo del suelo.

Otras características y ventajas de la presente invención se pondrán de manifiesto de modo más claro con la lectura de la descripción que sigue de varias realizaciones preferidas de la invención, dadas a título de ejemplos no limitativos, refiriéndose a los dibujos anejos correspondientes, en los cuales:

- la figura 1 es una vista frontal vertical esquemática de una antena de acuerdo con la realización preferida de la invención;
- la figura 2 es una vista desde arriba del bucle de excitación de la antena mostrada en la figura 1;
- la figura 3 es una vista lateral vertical detallada de un poste aislante que soporta el bucle de excitación;
- la figura 4 es una vista esquemática en perspectiva de una jaula de varios hilos metálicos paralelos para el bucle de excitación o para un elemento de unión metálico de acuerdo con una variante de la antena;
- la figura 5 es una vista desde arriba en perspectiva del elemento de unión del bucle de excitación a un plano de masa de la antena de acuerdo con la invención;
- la figura 6 muestra esquemáticamente componentes de campo eléctrico en una línea equivalente a la antena de acuerdo con la invención; y
- la figura 7 es un esquema análogo a la figura 1 para adaptar la conexión de un emisor a la antena en función de la impedancia característica del emisor.

Refiriéndose a las figuras 1 y 2, una antena de suelo de acuerdo con la invención que radia con una longitud de onda útil λ , de emisión o de recepción, sensiblemente kilométrica o sensiblemente hectométrica, comprende esencialmente un plano de masa metálico 1 sensiblemente horizontal, un bucle de excitación metálico abierto (o cerrado) sensiblemente horizontal 2, y un elemento de unión metálico 3, sensiblemente vertical, que une el bucle de excitación al plano de masa.

El plano de masa 1 está enterrado en la proximidad y debajo de la superficie del suelo S con un espesor de tierra e de algunas decenas de centímetros, típicamente 40 cm aproximadamente debajo de la superficie del suelo. Por ejemplo, el plano de masa está recubierto de tierra, incluso de cualquier disposición decorativa como un césped, o un parterre de vegetales. El plano de masa ocupa una superficie en el suelo de algunas centenas de metros cuadrados a algunas decenas de millares de metros cuadrados. El contorno del plano de masa es regular y puede ser sensiblemente circular o poligonal regular, por ejemplo cuadrado con un lado superior a 5 m aproximadamente.

El plano de masa 1 es metálico y debe asegurar una excelente continuidad eléctrica entre los elementos que le componen con el fin de que éste contribuya al carácter omnidireccional de la antena, sea de construcción fácil y por tanto poco cara, y sea insensible a los ataques químicos en el medio natural que es la tierra. De acuerdo con una primera realización, el plano de masa está constituido por chapas soldadas. Las chapas están ancladas directamente en la tierra y están soldadas o unidas por grapas metálicas una a otra con el fin de asegurar una excelente continuidad eléctrica entre las chapas y la tierra. De acuerdo con una segunda realización, el plano de masa es un enrejado metálico. El enrejado está compuesto por hilos de hierro con mallas por ejemplo cuadradas que tienen un lado pequeño con respecto a la longitud de onda útil λ , por ejemplo comprendido entre $\lambda/20$ aproximadamente y $\lambda/10$ aproximadamente. El enrejado metálico puede estar formado también al menos parcialmente por armaduras cubiertas de hormigón, por ejemplo el hormigón armado de una losa o de cualquier otra estructura subterránea existente o que haya que construir. El plano de masa 1 puede ser por ejemplo de cobre o de aluminio, o de una aleación que tenga por componente esencial el cobre o el aluminio.

El bucle de excitación metálico abierto (o cerrado) 2 se extiende sensiblemente horizontal por encima de la superficie del suelo S a una altura h y por encima del plano de masa 1 a una altura H. La altura H es en general superior a 2 m aproximadamente y la altura h se deduce de H-e. Para las longitudes de ondas kilométricas y hectométricas, el bucle de excitación 2 tiene una longitud superior a 25 m aproximadamente. Preferentemente, la forma del bucle 2 es semejante al contorno regular del plano de masa 1 y así puede ser circular, elíptico, rectangular, rómbico, o poligonal regular, por ejemplo cuadrado con un lado C superior a 5 m aproximadamente, como está ilustrado en la figura 2. Sin embargo, la forma del bucle, como el contorno del plano de masa, no está limitada a las formas antes citadas y se determina en función de la pureza de la polarización y la omnidirectividad que se desee para la antena. El bucle y el plano de masa están superpuestos de tal manera que queden centrados en un eje común vertical VV. El bucle de excitación 2 tiene una longitud L_2 sensiblemente igual a un múltiplo de cuarto de longitud de onda útil λ de la antena.

De acuerdo con la realización en modo de cuarto de onda ilustrada en la figura 2, el bucle 2 es cuadrado con lados C de longitud $\lambda/6$ aproximadamente. Uno de los lados del bucle 2 es más corto de manera que quede dispuesta una abertura 21-22 por ejemplo en la proximidad de uno de los vértices del bucle cuando éste es poligonal. La abertura 21-22 puede estar practicada en cualquier lugar a lo largo del contorno regular del que se obtiene el bucle. La longitud LO de la abertura 21-22 es un compromiso entre una abertura demasiado estrecha que genera potenciales demasiado importantes en las extremidades del bucle que habría que evacuar y una abertura demasiado ancha que lleva poca corriente circulando por el bucle de una 21 de sus extremidades hacia la otra 22 en detrimento del carácter omnidireccional de la antena.

De acuerdo con un ejemplo en modo cuarto de onda a cuyas dimensiones se hará referencia en lo que sigue, una antena de suelo de acuerdo con la invención para emitir ondas kilométricas alrededor de $\lambda = 309,6$ m aproximadamente, ya sea en una banda de frecuencia útil centrada en una frecuencia F = 969 kHz aproximadamente y de anchura limitada entre 5 kHz aproximadamente y 10 kHz aproximadamente, es de longitud $L_2 = \lambda/4 = 4C - LO = 4 * 19,6 - 1 = 77,4$ m y cuadrada con lados C de longitud $\lambda/16$ aproximadamente, o sea típicamente de 19,6 m. La abertura 21-22 tiene aquí una longitud LO de un metro, y el lado del bucle alineado con la abertura tiene una longitud de 18,6 m.

Como muestran las figuras 1 y 3, el bucle de excitación 2 es sostenido en un plano horizontal por encima del suelo S a la altura h por postes aislantes sensiblemente verticales 4 que están repartidos regularmente a lo largo del bucle, por ejemplo cada 4 m a 5 m. Cada poste 4 es por ejemplo de madera o de material plástico. Una extremidad superior del poste puede estar ranurada para colocar y fijar en ella el bucle de excitación por un collarín. Una extremidad inferior del poste atraviesa

un bloque de hormigón 41 que se apoya sobre el suelo S y se aloja en un tubo 42 de material plástico tal como PVC que está empotrado en un pie de hormigón 43 colado en el suelo y que tiene una altura superior al espesor e, por ejemplo de 1,2 m, y así atraviesa el plano de masa 1.

5 El bucle de excitación 2 está realizado preferentemente en un tubo metálico galvanizado de diámetro D. Asimismo, el elemento de unión 3 es un vástago tubular metálico galvanizado que tiene una altura H superior a 2 m aproximadamente. Los diámetros de sección transversal, es decir, el diámetro D del tubo del bucle de excitación 2 y el diámetro d del tubo del elemento de unión 3, están comprendidos entre 5 cm aproximadamente y 20 cm aproximadamente, y pueden ser idénticos. De acuerdo con el ejemplo antes citado, el bucle de excitación y el elemento de unión son de tubo de 10 acero de diámetro $D = d = 60$ mm. Los diámetros D y d pueden ser iguales y son tanto mayores cuanto más ancha es la banda pasante de la antena. Los tubos son, por ejemplo de acero o, preferentemente, de un conductor mejor, por ejemplo de cobre o de aluminio, o de una aleación que tenga como componente preponderante el cobre o el aluminio.

15 En variante, el bucle de excitación 2 está constituido por varios tubos superpuestos o paralelos, distantes algunas decenas de centímetros con el fin de permitir una potencia más elevada, una banda pasante mejorada y una disminución de las pérdidas. Las longitudes y los diámetros de los tubos superpuestos o paralelos pueden ser ligeramente diferentes con el fin de asegurar una sintonización desplazada que permita el agrandamiento de la banda pasante en modo par o impar. En particular, en el modo par (semionda), las dos extremidades 21 y 22 del bucle se cierran con la masa con uniones a 20 ésta ligeramente diferentes.

En variante, el bucle de excitación 2 y el elemento de unión 3 podrían ser más delgados y estar realizados cada uno en forma de un hilo metálico o de una capa de hilos metálicos, lo que conduciría a disminuir la banda pasante de la antena.

25 De acuerdo con otra variante representada en la figura 4, con el fin de permitir una potencia de emisión relativamente elevada y disminuir las pérdidas eléctricas, el bucle de excitación 2 y el elemento de unión 3 son cada uno en forma de una jaula de diámetro D, d compuesta por varios hilos metálicos paralelos 23 equirrepartidos circularmente y que tienen un diámetro comprendido entre 0,6 mm aproximadamente y 1,2 mm aproximadamente. La jaula que constituye el bucle de excitación 2 comprende anillos metálicos 24 soldados a los hilos repartidos regularmente en su longitud, por ejemplo cada 5 m a 10 m, para mantener los hilos 23 paralelos y equidistantes dos a dos y así 30 conservar la distribución equipotencial en sección circular en la jaula. Para diámetros respectivos idénticos D, d, las jaulas son ventajosamente más ligeras que los tubos y el conjunto de los hilos de las jaulas es menos caro que los tubos. Esta variante no disminuye las prestaciones de la antena y en particular permite obtener potencias de emisión superiores a 5 kW al tiempo que garantiza una banda pasante relativamente ancha. 35

El elemento de unión 3 tiene una extremidad superior 31 soldada a una 21 de las extremidades del bucle de excitación 2. Una extremidad inferior 32 del elemento de unión está soldada al plano de masa 1, por ejemplo por intermedio de una placa pequeña de latón 11, soldada a algunas mallas del plano de masa cuando éste es un enrejado, como muestra la figura 5.

40 De acuerdo con el ejemplo antes citado, la altura del elemento de unión es $H = 2,9$ m, y el bucle de excitación está a una altura $h = H - e = 2,5$ m por encima del suelo. El enterramiento del plano de masa 1 en el suelo S subyacente al bucle de excitación 2 ligeramente por encima del suelo hace a la antena de suelo de acuerdo con la invención casi invisible y discreta especialmente en medio urbano, en comparación con una antena de poste.

45 La antena de suelo así descrita, en cuarto de onda y modo impar, es sensiblemente equivalente a una línea cuarto de onda de grandes dimensiones que radia omnidireccionalmente una onda de suelo de polarización vertical en un radio de algunos kilómetros a algunas decenas de kilómetros en función de la potencia de algunos kilovatios a algunas decenas de kilovatios de un medio de alimentación de potencia de la antena. Este último comprende principalmente un emisor 5 50 instalado sobre el suelo, en la proximidad del plano de masa 1 del bucle de excitación 2, por ejemplo para emitir programas de radiodifusión a través de la antena, y un cable de alimentación. Como muestra esquemáticamente la figura 1, dos hilos 51 y 52 del cable de alimentación unen bornes negativo y positivo del emisor 5 respectivamente al plano de masa 1 y al bucle de excitación 2 a una distancia pequeña predeterminada l del elemento de unión 3 a lo largo del bucle de excitación tal que 55 la parte real de la impedancia de la antena llevada a los bornes del emisor sea sensiblemente igual a la impedancia característica del medio de alimentación de potencia.

Además, la pequeña impedancia de la antena de suelo cuya parte real es del orden de 1 a 2 ohmios aproximadamente, es compatible con un amplificador de estado sólido a la salida del emisor 4 cuya impedancia de salida es pequeña.

5 Típicamente, la antena de suelo con las dimensiones antes citadas radia un campo eléctrico superior a 2 mV/m en un radio de acción de 5 km aproximadamente con una potencia de emisor de 10 W y en un radio de acción de 20 km a 50 km aproximadamente con una potencia de emisor de 5 kW.

10 El modo de funcionamiento de la antena de suelo de acuerdo con la invención se basa en la excitación del suelo por el bucle de excitación metálico 2 en cuarto de onda, atrapado entre la superficie del suelo S y el plano de masa 1 con el fin de crear una componente de campo eléctrico normal E_y que asegure a la antena la polarización vertical. El bucle de excitación 2 hace la función de fuente de excitación lineal horizontal colocada por encima del suelo y recorrida por una corriente paralela al suelo en régimen de onda estacionaria o progresiva según la anchura de la banda de frecuencia deseada. La onda de suelo generada por la antena se encuentra guiada por la banda de tierra a consecuencia de reflexiones múltiples sobre la superficie de separación entre el dieléctrico 15 constituido por la tierra y el medio exterior constituido por el aire y sobre la superficie metálica enterrada constituida por el plano de masa 1. El plano de masa 1 necesario para generar la onda en el suelo presenta preferentemente lados C que son sensiblemente de longitud doble de los lados del bucle de excitación cuando el bucle y el plano de masa son cuadrados; de modo más general, el plano de masa 1 presenta una superficie que es sensiblemente el cuádruplo de la superficie circunscrita por el bucle de excitación 2, lo que evita efectos de bordes de campo eléctrico entre el bucle de excitación 20 y el plano de masa y mejora el confinamiento de las líneas de campo eléctrico debajo del bucle de excitación. Gracias al enterramiento del plano de masa 1, las líneas de campo eléctrico están canalizadas a ras del suelo S de manera que inyectan una corriente elevada a alta frecuencia en el suelo y así propagan en éste una onda de suelo hectométrica, o kilométrica, portadora de la señal de emisión útil. El espesor e influye igualmente en el funcionamiento de la antena particularmente en la reactancia capacitativa de la antena.

30 Desde el punto de vista geométrico, se demuestra que la antena de suelo es asiento de dos ondas: una onda de superficie en el aire, denominada evanescente, y una onda guiada, denominada cautiva, en la tierra, que es un dieléctrico con pérdida según la frecuencia útil. La resolución de las ecuaciones de Maxwell para los dos medios constituidos por el aire y la tierra demuestra que en cada uno de los dos medios:

- una onda transversa eléctrica TE se propaga únicamente si la longitud de onda es la longitud de onda de corte siguiente:

$$\lambda_c = 4 e \sqrt{N^2 - 1}$$

35 y

- una onda transversa magnética TM puede existir cualquiera que sea el espesor e de la tierra dieléctrica.

La constante de atenuación en la tierra dieléctrica de índice de refracción N viene dada por:

$$\alpha = 4 \pi e (N^2 - 1) / (\lambda N^2)$$

40 La onda evanescente acompaña a la onda cautiva, y tiene un gran interés para la difusión puesto que es percibida en la superficie del suelo. Ésta decrece por encima del suelo sensiblemente de modo exponencial.

45 La onda cautiva es una onda guiada en el interior de la tierra. Una onda guiada pura no puede dar lugar a ninguna radiación salvo si la onda encuentra cualquier clase de discontinuidades como cambios de índices de refracción, de medios, de dimensiones o de obstáculos. La evaluación de la energía radiada puede ser efectuada en un modelo simple constituido por dos medios de índices de refracción N_1 y N_2 y de atenuación α_1 y α_2 . Se demuestra que el coeficiente de transmisión T de la onda de superficie a través de la discontinuidad, o en otras palabras, la relación T entre las amplitudes en el medio N_1 y el medio N_2 puede escribirse:

$$50 \quad T = 2 [(\alpha_1 \alpha_2) / (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/2}.$$

La presencia de la discontinuidad provoca entonces una pérdida de energía radiada que se puede evaluar como:

$$D^2 = 1 - T^2 = (\alpha_1 - \alpha_2)^2 / (\alpha_1 + \alpha_2)^2$$

5 La antena de suelo de acuerdo con la invención se basa en este principio. Como muestran las ecuaciones precedentes, cualquier variación de un índice de refracción N_1 o N_2 o del espesor e , provoca una atenuación diferente y por tanto una radiación diferente. La antena de acuerdo con la invención explota la discontinuidad entre el aire y el suelo y radia así gracias a la principal discontinuidad, indicada por D en la figura 1, creada en la periferia de la antena entre el par suelo y plano de masa metálico y el suelo sin el plano de masa metálico. La invención saca partido de la buena conducción eléctrica de la tierra, o del suelo en general, a las frecuencias bajas, para solicitar el suelo como vector de propagación de la onda de superficie y de la onda guiada.

10 Con las longitudes de onda útiles de la antena de acuerdo con la invención, solo la onda transversa magnética TM es excitada por la corriente en el bucle de excitación 2 paralela al suelo en algunos metros. La altura H con respecto al suelo resulta de un compromiso entre un modo de acoplamiento ajustado y la banda pasante deseada.

15 La antena de acuerdo con la invención puede ser considerada en análisis radioeléctrico algo equivalente a una línea bifilar de longitud L_2 supuesta próxima al cuarto de onda (modo impar) para la frecuencia útil, como está esquematizado en la figura 6. Uno de los hilos de la línea bifilar está constituido por el bucle de excitación 2 y está situado en el aire por encima del suelo S . El otro hilo de la línea bifilar está constituido por el plano de masa 1 en el interior del suelo. La línea bifilar presenta por tanto un medio sin pérdidas y un medio con pérdidas: siendo los dos medios diferentes, se genera un desequilibrio en el modo línea fundamental de la línea. Este desequilibrio solo puede ser reestablecido por la presencia de una corriente diferencial que se asiente en la superficie del suelo imperfecto, pero muy buen conductor de la onda de suelo.

25 Se recuerda que el campo eléctrico E de una onda que se propaga en la superficie de un conductor perfecto es perpendicular a esta superficie, sin componente de campo tangencial E_x . Al no ser el suelo perfecto, aparece una componente tangencial suplementaria E_x en la superficie del suelo. El campo eléctrico presenta, así, una componente vertical E_y preponderante en la superficie del suelo S y la componente tangencial suplementaria E_x , y se hace elíptico en un plano paralelo a la dirección de propagación. La discontinuidad del medio aire/suelo y la pérdida en el suelo dieléctrico conducen al establecimiento de una corriente de suelo.

30 La polarización vertical es explotada en la antena de acuerdo con la invención, siendo la componente de campo eléctrico horizontal despreciable en la propagación por la antena tanto más cuanto que el bucle de excitación 2 sea regular y cerrado como un círculo o un polígono regular. Los campos eléctricos elementales E_y están distribuidos casi uniformemente en todos los acimuts alrededor del eje vertical VV de la antena para asegurar la omnidirectividad de la antena.

35 Para satisfacer condiciones de resonancia de la antena de la invención, la impedancia de radiación Z_{ant} de la antena debe tener una parte imaginaria o reactancia nula, y la longitud L_2 del bucle de excitación 2 debe ser del orden del cuarto de longitud de onda $\lambda/4$ (modo impar) o semionda $\lambda/2$ (modo par). En el modo de funcionamiento previsto y refiriéndose a la figura 7, siendo la impedancia de radiación de la antena relativamente pequeña, del orden de algunos ohmios, la impedancia de radiación Z_{ant} es la impedancia llevada de una impedancia terminal Z_t a través de las dos partes de la antena, el bucle de excitación horizontal 2 y el elemento de unión vertical 3, que tienen impedancias características propias Z_2 y Z_3 . La impedancia terminal Z_t está colocada en el extremo de línea en la extremidad del bucle 22, entre esta extremidad y el plano de masa 1.

Se supone en primer lugar que la antena funciona sin carga terminal, o sea $Z_t = \infty$.

45 La línea horizontal constituida por el bucle de excitación 2 de longitud L_2 y de diámetro D , colocada a la altura H por encima del plano de masa metálico, tiene una impedancia característica de:

$$Z_2 = 138 \log(4H/D).$$

La impedancia Z_{21} llevada a la extremidad 21 de la línea horizontal por transformación de la impedancia terminal Z_t es:

50
$$Z_{21} = Z_2 (Z_t + j Z_2 \operatorname{tg}(\beta L_2)) / (Z_2 + j Z_t \operatorname{tg}(\beta L_2)),$$

o sea para $Z_t = \infty$, $Z_{21} = -jZ_2 \cot(\beta L_2)$,

con $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi F/c$, siendo c la velocidad de la luz.

ES 2 356 087 T3

La línea vertical constituida por el elemento de unión 3 de altura H y de diámetro d tiene una impedancia característica sensiblemente igual a:

$$Z_3 = 60 (2,306 \log (4H/d) - 1).$$

5 La impedancia llevada al pie de la línea vertical por transformación de la impedancia terminal Z_{21} es:

$$Z_{ant} = Z_3 (Z_{21} + j Z_3 \operatorname{tg} (\beta H)) / (Z_3 + j Z_{21} \operatorname{tg} (\beta H)),$$

o sea

$$Z_{ant} = Z_3 (-j Z_2 \operatorname{cotg} (\beta L_2) + j Z_3 \operatorname{tg} (\beta H)) / (Z_3 + Z_2 \operatorname{cotg} (\beta L_2) \operatorname{tg} (\beta H)).$$

10 La parte imaginaria de la impedancia Z_{ant} es anulada por la relación siguiente para satisfacer la condición de resonancia de la antena:

$$Z_2 \operatorname{cotg} (\beta L_2) = Z_3 \operatorname{tg} (\beta H)$$

Para el ejemplo de la antena definido anteriormente con dimensiones de $H = 2,9$ m, $D = d = 0,063$ m y $L_2 = 77,4$ m, las impedancias características de las líneas son $Z_2 = 312 \Omega$, y $Z_3 = 253 \Omega$, y $\beta L_2 = 87,3^\circ$ se deduce de la igualdad que satisface la condición de resonancia.

15 La frecuencia teórica de resonancia de la antena de suelo tiene el valor siguiente que ha sido verificado por mediciones, salvo algunos kilohercios:

$$F = c (\beta L_2) / (360^\circ L_2)$$

$$F = 87,3 * 299795 / (360 * 77,4) = 939 \text{ kHz.}$$

20 En variante, la impedancia terminal Z_t es reactiva o resistiva o nula y cierra la extremidad 22 del bucle de excitación 2 y puede ser regulable para ajustar la frecuencia de funcionamiento radiada por la antena. Constituida por una capacidad, la impedancia Z_t disminuye la frecuencia de funcionamiento de la antena por alargamiento eléctrico; constituida por una bobina, la impedancia Z_t aumenta la frecuencia de funcionamiento. La colocación de una carga terminal aumenta la banda pasante, pasando de un régimen de ondas estacionarias a un régimen de ondas progresivas.

25 Por ejemplo, la impedancia terminal Z_t que cierra el bucle de excitación metálico 2 es un cortocircuito constituido por un segundo elemento de unión metálico sensiblemente vertical que une la extremidad 22 del bucle de excitación 2 al plano de masa 1. Las dos extremidades del bucle de excitación en cuarto de onda se cierran con la masa y la antena funciona en modo par, como una línea semionda, con una banda relativamente ancha de al menos 10 kHz.

30 Para considerar la antena en resonancia, la resistencia de radiación de la antena es evaluada por las fórmulas siguientes:

$$R_r = 160 \pi^2 (H / \lambda)^2 = 0,15 \Omega,$$

y la resistencia de pérdida del tubo y del plano de masa es estimada como $R_p = 1 \Omega$ según el material utilizado, en este caso el acero. El rendimiento de la antena se deduce por la relación:

35
$$\eta_{ant} = R_r / (R_r + R_p) = 0,15 / 1,15 = 13 \%$$

La elección de un material, tal como el cobre, mejor conductor que el acero, y de un diámetro de los tubos mayor para el bucle de excitación 2 y el elemento de unión 3, por ejemplo $D = d = 160$ mm, mejora netamente el rendimiento de la antena disminuyendo el valor de la resistencia de pérdida R_p .

40 Estando la antena en resonancia, la impedancia a nivel del elemento de unión vertical 3 es pura y tiene por valor:

$$R_{ant} = R_r + R_p = 1,15 \Omega$$

45 Para adaptar la antena a la impedancia característica Z_C del medio de alimentación de potencia que comprende el emisor 5, igual clásicamente a 50Ω , se busca a lo largo de la línea horizontal constituida por el bucle de excitación 2, a partir del vientre de la corriente situado en la extremidad 21, la distancia l entre un punto P y la extremidad 21 para la cual una admitancia que tiene como parte real la deseada ($1/Z_C$) y como parte reactiva ($-jX$) es satisfecha por un tirante en paralelo $+jX =$

$jZ_2 \text{tg}(\beta l)$. El tirante está compuesto por la línea horizontal de pequeña longitud entre la extremidad 21 unida al elemento de unión vertical 3 cuya impedancia es una resistencia pura pequeña $R_{\text{ant}} = 1,15 \Omega$, y el punto P. La impedancia en el punto P vale aproximadamente $R_{\text{ant}} - jX$.

5 Despreciando la impedancia terminal Z_t que es muy pequeña llevada al punto P próximo a la extremidad 21, la ecuación que hay que resolver es la siguiente:

$$R_{\text{ant}} - jX = (Z_C // jx),$$

o

$$R_{\text{ant}} - jX = (Z_C * j Z_2 \text{tg}(\beta l) / (Z_C + j Z_2 \text{tg}(\beta l))).$$

10 Por iteraciones, el valor de $Z_2 \text{tg}(\beta l)$ es de 8Ω , lo que corresponde aproximadamente a una longitud l de 1,3 m sobre la línea horizontal, es decir, desde la extremidad 21 del bucle de excitación 2 hasta el hilo de cable de alimentación 52 que hay que situar y conectar.

15 La banda pasante de la antena de acuerdo con la invención depende esencialmente de un circuito que comprende los elementos que participan en la radiación: el plano de masa metálico 1, los tubos 2 y 3, o los hilos o las jaulas 23 de acuerdo con las otras variantes, el suelo S y el medio de adaptación constituido por el tirante de longitud l . Como el coeficiente de sobretensión Q y la banda pasante están ligados, se lleva el estudio al del coeficiente de sobretensión:

$$Q = \frac{\text{PotenciaReactiva}}{\text{PotenciaActiva}} = \frac{L\omega}{R_s}$$

20 La parte real equivalente al circuito es pequeña, del orden de 1Ω a 2Ω , lo que favorece la inyección de una corriente elevada en el suelo, y la parte reactiva del circuito es tanto más elevada cuanto más delgado es el tubo, o el hilo o la jaula de acuerdo con las otras variantes. La colocación de un tubo de mayor diámetro tiene por efecto disminuir la autoinducción lineal parásita y de reducir la pérdida óhmica. Por un lado, se aumenta la banda pasante y por otro se mejora el rendimiento.

25 Se recuerda que un hilo conductor de longitud L_2 por encima del suelo que tiene una extremidad en la masa tiene, para dimensiones expresadas en cm, una inductancia expresada en μH de:

$$L_{\text{hilo}} = 0,002 [2,3026 \log(4(H)/d) - CT + \mu_r \delta],$$

donde CT es una constante que depende de la relación $2(H)/L_2$, $\mu_r = 1$ la permeabilidad magnética relativa y δ depende del efecto de piel del metal.

30 De acuerdo con un ejemplo, el cobre compone esencialmente el material que constituye los tubos del bucle de excitación 2 y el elemento de unión 3. El cobre tiene una resistencia lineal de $1 \Omega / 25 \text{ m}$ cuando éste es atravesado por una frecuencia de 1 MHz para un perímetro de 1 cm. La resistencia lineal del cobre es inversamente proporcional al perímetro, lo que incita a elegir diámetros D y d de los tubos relativamente grandes. Así, para $L_2 = 77,4 \text{ m}$, $H = 2,9 \text{ m}$, $CT = 0,07$ y $\delta = 0$, un tubo de cobre de diámetro d o $D = 63 \text{ mm}$ tiene una inductancia lineal de $1,04 \mu\text{H}/\text{m}$, una inductancia total de $L_{\text{hilo}} = 80,5 \mu\text{H}$, y una reactancia de $L_{\text{hilo}}\omega = (2\pi F L_{\text{hilo}}) = 475 \Omega$, con una resistencia de pérdida óhmica de $0,15 \Omega$, y un tubo de cobre de diámetro d o $D = 160 \text{ mm}$ tiene una inductancia lineal de $0,85 \mu\text{H}/\text{m}$, una inductancia total de $L_{\text{hilo}} = 65,8 \mu\text{H}$ y una reactancia de $L_{\text{hilo}}\omega = (2\pi F L_{\text{hilo}}) = 388 \Omega$, con una resistencia de pérdida óhmica de $0,06 \Omega$.

40 Así pues, el coeficiente de sobretensión de la antena con el bucle de excitación 2 y el elemento de unión 3 en tubo de cobre es muy elevado y por tanto presenta una banda pasante ancha de varios kilohercios para una frecuencia de portadora de un megahercio aproximadamente, en comparación con aceros de buena calidad en los cuales la conductividad no excede del 15 % de la del cobre.

45 Ventajosamente, la antena de acuerdo con la invención produce, contrariamente a una antena de poste, una onda de espacio en modo radiación magnética y no eléctrica según la dirección del eje vertical V-V. La onda de espacio resulta de la desigualdad de las corrientes en la línea constituida por el bucle de excitación 2 y en el suelo que contiene el plano de masa. Esta desigualdad impide a la vertical de la antena anular componentes de campo verdaderas y componentes de campo de la imagen de la línea con respecto al espejo constituido por el plano de masa. La potencia de esta onda de espacio más pequeña que la potencia de la onda de suelo puede ser incrementada aumentando la potencia del emisor 5 con el fin de explotarla para una difusión ionosférica nocturna de señales. Esta

5 posibilidad de tiro cenital denominada también “tiro a la africana” es una ventaja mayor de la antena de la invención y permite transmitir una parte de la energía radiada hacia las capas ionosféricas E y F propicias para la propagación nocturna a corta distancia en un radio de acción superior a 30 km aproximadamente, lo que es imposible con los postes radiantes actuales en onda media que no radian ninguna energía vertical.

10 En función de las necesidades, la directividad de la antena puede ser acentuada y privilegiada según una o algunas direcciones predeterminadas por la instalación de uno o de algunos medios de confinamiento colocados sensiblemente en la periferia del plano de masa y en la proximidad del suelo, es decir sobre el suelo o en el interior del suelo, para confinar radiación electromagnética de la antena respectivamente según la citada o una de las citadas direcciones predeterminadas. Estos medios de confinamiento de radiación electromagnética presentan una permitividad dieléctrica relativa ϵ_r y/o una permeabilidad magnética relativa μ_r diferentes de las del suelo (tierra) con el fin de crear discontinuidades del medio de propagación a nivel del suelo S, en prolongación de la discontinuidad D en la periferia de la antena entre el par suelo S y plano de masa metálico 1 y el suelo S sin el plano de masa metálico.

15 Cada medio de confinamiento de radiación comprende uno o algunos obstáculos conductores de la radiación electromagnética y que constituyen zonas de difracción equivalentes a fuentes de radiación puntuales según la dirección predeterminada respectiva. Como está representado en la figura 1 para una dirección predeterminada hacia la derecha, obstáculos son por ejemplo fosas 61 que están vacías o llenas de elementos metálicos con una profundidad comprendida entre 50 cm y algunos metros en función de la penetración de la onda radiada en el suelo. Obstáculos pueden igualmente jalonar la superficie del suelo, como protuberancias metálicas o rastras metálicas 62 de alturas pequeñas sobre el suelo.

20 La distancia entre los obstáculos o discontinuidades es optimizada si la directividad es muy necesaria: en este caso, cada obstáculo es considerado como una fuente de radiación, y entre las fuentes de radiación se establece una regla de puesta en fase, por ejemplo por la elección de una distancia próxima a $\lambda/4$ entre ellas.

25 Se señalará que la antena de suelo de acuerdo con la invención descrita anteriormente puede ser indiferentemente una antena de emisión para emitir, o bien una antena de recepción para recibir, una onda kilométrica o hectométrica de suelo portadora de una señal útil, al tiempo que es discreta e insensible a los parásitos exteriores en el suelo y de la ionosfera.

REIVINDICACIONES

1. Antena de suelo, que comprende un plano de masa (1), un bucle de excitación metálico (2) abierto entre dos extremidades (21, 22) y que se extiende sensiblemente paralelamente al plano de masa, y un elemento de unión metálico (3) sensiblemente perpendicular al bucle y que une una (21) de las extremidades del bucle de excitación al plano de masa, caracterizada porque, para radiar una onda de suelo kilométrica o hectométrica, el plano de masa (1) está enterrado sensiblemente horizontalmente en la proximidad y debajo de la superficie del suelo (S), el bucle de excitación (2) se extiende sensiblemente horizontalmente por encima de la superficie del suelo a una altura (H) superior a 2 m aproximadamente con respecto al plano de masa y el bucle de excitación y el elemento de unión están constituidos cada uno por al menos un elemento cilíndrico delgado.
2. Antena de acuerdo con la reivindicación 1, en la cual el plano de masa (1) es de chapa.
3. Antena de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en la cual el plano de masa (1) es un enrejado metálico.
4. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende postes aislantes sensiblemente verticales (4) para sostener el bucle de excitación (2) por encima del suelo (S).
5. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la cual el bucle de excitación (2) tiene una longitud (L_2) sensiblemente igual al cuarto o múltiplo de cuarto de onda de una longitud de onda útil de la antena.
6. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la cual el bucle de excitación (2) tiene una longitud superior a 25 m aproximadamente.
7. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la cual la abertura del bucle de excitación (2) es muy pequeña con respecto a la longitud del bucle en una relación de 1/50 aproximadamente a 1/100 aproximadamente de la longitud del bucle.
8. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la cual el plano de masa (1) y el bucle de excitación metálico (2) son poligonales regulares o circulares.
9. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en la cual la superficie del plano de masa (1) es sensiblemente el cuádruplo de la superficie circunscrita por el bucle de excitación (2).
10. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la cual el bucle de excitación (2) y el elemento de unión (3) son esencialmente de cobre.
11. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en la cual el bucle de excitación (2) y el elemento de unión (3) son tubulares.
12. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en la cual el bucle de excitación (2) y el elemento de unión (3) son jaulas o capas de hilos metálicos paralelos (23).
13. Antena de acuerdo con las reivindicaciones 11 o 12, en la cual el bucle de excitación (2) y el elemento de unión (3) tienen diámetros de sección transversal (D, d) comprendido entre 5 cm aproximadamente y 25 cm aproximadamente.
14. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en la cual el bucle de excitación (2) está constituido por tubos paralelos muy ligeramente diferentes en longitudes y diámetros.
15. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, que comprende una impedancia terminal (Z_t) entre la otra (22) de las extremidades del bucle de excitación y el plano de masa (1).
16. Antena de acuerdo con la reivindicación 15, en la cual la impedancia terminal (Z_t) es regulable para ajustar una frecuencia de funcionamiento de la antena.
17. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, que comprende un medio de alimentación de potencia que tiene bornes (51, 52) unidos respectivamente al bucle de excitación (2) y al plano de masa (1) a una distancia (l) del elemento de unión (3) a lo largo del bucle

de excitación tal que la impedancia del bucle de excitación llevada desde el elemento de unión (3) es sensiblemente igual a la impedancia característica del medio de alimentación de potencia.

5 18. Antena de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17, que comprende un medio (61, 62) colocado sensiblemente en la periferia del plano de masa (1) y en la proximidad del suelo (S) para confinar la radiación electromagnética de la antena respectivamente según una dirección predeterminada a lo largo del suelo.

19. Antena de acuerdo con la reivindicación 18, en la cual el medio para confinar la radiación electromagnética de la antena comprende fosas (61) en el suelo y/o protuberancias (62) sobre el suelo.

FIG. 1

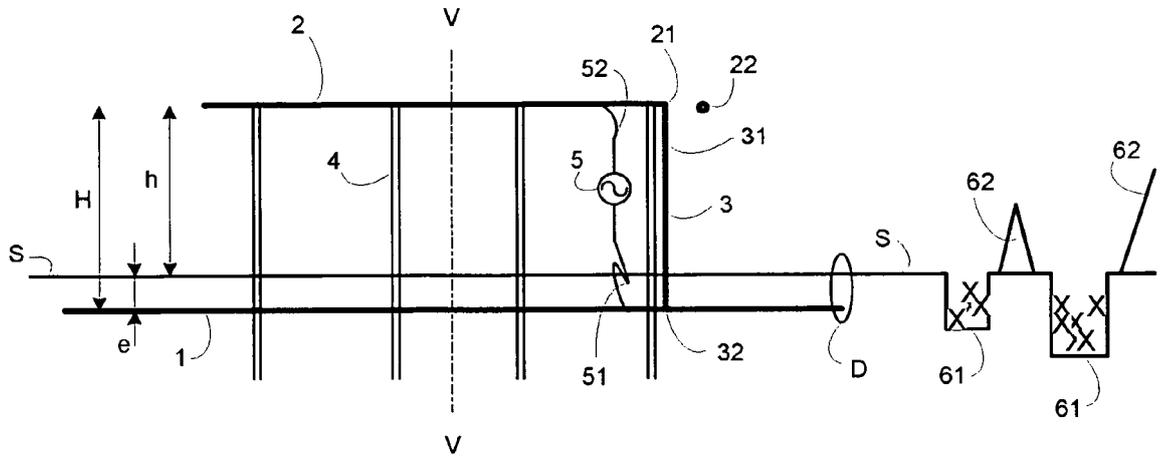


FIG. 2

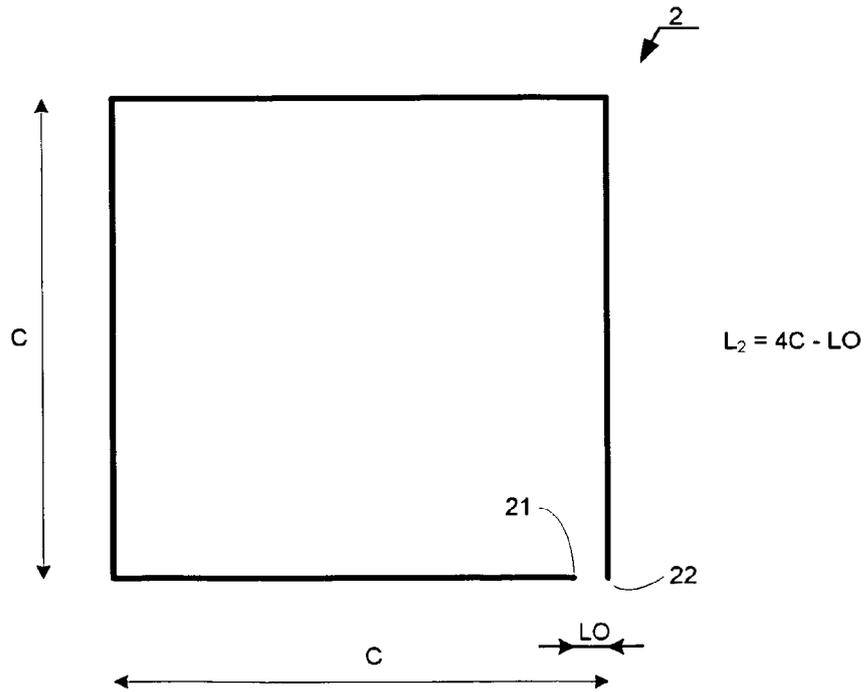


FIG. 3

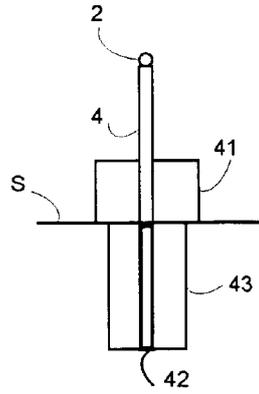


FIG. 4

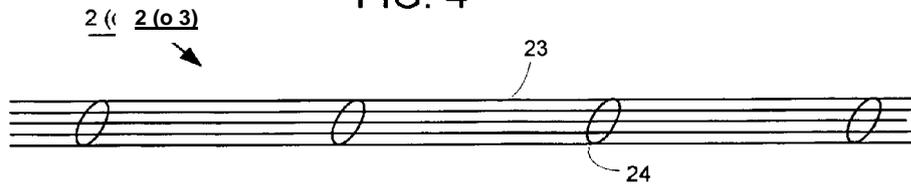


FIG. 5

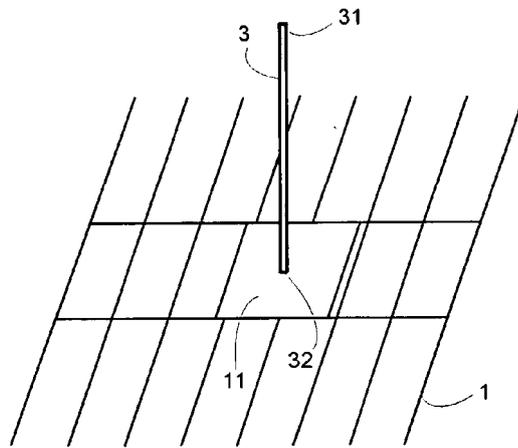


FIG. 6

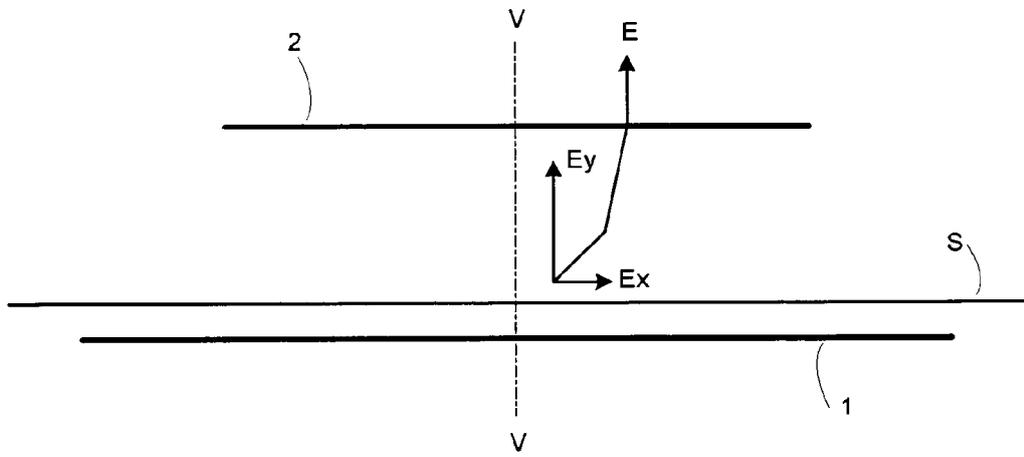


FIG. 7

