



WormAnt, la enigmática antena de suelo

En el presente artículo se describen una serie de experiencias en comunicaciones subterráneas, principalmente en MF y HF. Se menciona también el desarrollo y pruebas de campo de un dispositivo o transductor electromagnético resonante de banda ancha, para inducir y detectar radiación electromagnética a través del subsuelo. Se considera también la aptitud de este dispositivo, no solo para la intercomunicación cavidad-superficie con bajos niveles de potencia, si no también su idoneidad como antena «táctica» para uso general en comunicaciones de HF en superficie, para corta, media o larga distancia



J. Moldes
EB1HBK

Introducción. El mundo sin sol



Stefany en el pozo de acceso a la Sima Aradelas, en Lugo, la más profunda de Galicia

Además de radioaficionado también soy espeleólogo. Entre las diversas actividades espeleológicas que programamos en el seno del GES-CAM¹ a lo largo del 2017, se contemplaba una práctica de pernocta con vivac en el interior de una cavidad subterránea. Todo ello consistió en la instalación, a determinada profundidad, de un campamento dotado con el equipamiento imprescindible para hacer posible una estancia prolongada —no inferior a 24 horas—, incluyendo lo necesario para descansar con un mínimo de confort. Esto representa un desafío en sí mismo, tanto por las dificultades inherentes al medio subterráneo (ausencia de luz, orografía accidentada y laberíntica, presencia de agua, etc.), como por la exposición a valores extremos de humedad y temperatura durante un largo período. Las horas pueden hacerse muy largas en una actividad de esta índole, de modo que se incluye entre el equipo personal algo con lo que entretenerse, por ejemplo, un libro. Yo me llevé un receptor de radio.



Equipo de radio desplazado al interior de la Sima Aradelas



La antena de suelo resulta prácticamente invisible, lo que posibilita una operación discreta en los entornos más variados

En realidad, me llevé dos receptores: el primero era un receptor de ELF², compuesto por una antena activa y un *smartphone*, para estudiar la recepción de los 50 Hz de la red eléctrica y sus armónicos; el segundo era un minúsculo receptor musiquero multibanda. Este último está ya muy viejecito, con claros signos de deterioro lógico tras más de veinticinco años acompañándome en varias expediciones dentro y fuera de nuestras fronteras. Pero era la mejor opción disponible (sobre todo por tamaño) y además, su finalidad era estudiar someramente la interferencia electromagnética generada por los reguladores de nuestra iluminación LED. No podía yo imaginar siquiera la sorpresa que mi viejo y fiel compañero me iba a deparar...

El mundo subterráneo no está hecho a la medida del ser humano. Sumido en una noche perpetua, húmeda y fría, la oscuridad más profunda reina allí abajo de una manera absoluta, apenas incomodada fugazmente por nuestras linternas. Jamás ha llegado allí la luz del sol y esa ausencia de energía se manifiesta en un entorno extraño y fascinante donde el tiempo pareciera no transcurrir. Nada que ver, desde luego, con el mundo de superficie que todos conocemos. Elegimos para esta actividad la Sima Aradelas, ubicada en las montañas del Caurel, en la provincia de Lugo. Instalaríamos el campamento en una zona relativamente seca entre setenta y ochenta metros de profundidad. El descenso hasta esa zona solo es posible empleando equipo y técnicas específicas de progresión vertical. Si ello representa ya por sí mismo una actividad exigente, desde el punto de vista físico y psicológico, portear el equipo suplementario para instalar el campamento hace que recorrer esas decenas de metros resulte un proceso ciertamente penoso.



Zona de vivac y pernocta subterránea

Los tres integrantes del equipo: Stefany, Alberto, EA1GDH y quien esto escribe, llegamos sin novedad y procedimos a acondicionar la zona para el vivac. Encontrar un lugar más o menos plano y horizontal, y resguardado de las constantes goteras no es tarea baladí, pero resulta entretenido. Lo delicado llega sin duda cuando se terminan los quehaceres organizativos y deja uno de moverse. Los 9° C de temperatura ambiente y un nivel de humedad del 90 % acaban por entumecer a cualquiera en pocos minutos. En estas condiciones tan agradables, ¿cómo se desarrolló mi experimento con la radio?

Sabemos que las ondas electromagnéticas de frecuencia muy baja son las que mejor penetran en el subsuelo. Con unas pocas decenas de kHz se pueden alcanzar distancias de comunicación de voz bidireccional de centenares de metros. La atenuación de la onda se muestra muy variable dependiendo de las características geológicas del entorno, pero en general, es más acusada conforme subimos en frecuencia. Incluso —hasta donde conozco—, los georadars de campo no proporcionan resultados prácticos más allá de una o dos decenas de metros de profundidad cuando emplean frecuencias de HF. Teniendo todo esto en cuenta, el receptor de ELF (compuesto por la antena activa y el *smartphone*) que transporté hasta el interior de la cavidad, registró claramente la frecuencia de la red eléctrica y sus armónicos superiores, los cuales consiguen penetrar profundamente en el subsuelo.

A continuación, pasé a investigar el grado de interferencia electromagnética que generaban los reguladores conmutados (muy eficientes pero muy “ruidosos”), de nuestras iluminaciones LED, empleando para ello el pequeño receptor musiquero sintonizado en la banda de onda media (OM). Pudimos apreciar como el regulador de cada fabricante genera un patrón propio de interferencia electromagnética, como si se tratase de una «huella electromagnética» característica y diferente.



Recibiendo Radio Rumanía Internacional en Onda Corta desde el interior de Sima Ardelas

Escuchar los 50 Hz de la red y el ruido generado por las linternas LED, aunque es algo ciertamente fascinante, termina por hacerse monótono, así que a falta de otra cosa que hacer se me ocurrió explorar la banda de *broadcast* de OM con el receptor musiquero. Esta tarea resultaba un tanto pesada ya que la sintonización de frecuencias en el musiquero es digital y se selecciona mediante teclas UP-DOWN; durante el cambio de frecuencia el audio se silencia, lo cual obliga a pulsar tecla y escuchar, pulsar tecla y escuchar, seguir escuchando. ¡después de un rato resulta un engorro!

Realmente mi intención no iba más allá de otra cosa que matar el tiempo, manteniendo entretenida a la curiosidad. La sorpresa llegó cuando, en un determinado punto del dial, el ruido blanco constante de la banda se incrementó de pronto y, prestando mucha atención, se percibía un atisbo de modulación. Totalmente ininteligible debido a su ínfimo nivel, pero sin lugar a duda aquello era una señal residual modulada al límite de recepción. ¡Vaya sorpresa! una señal de onda media conseguía atravesar la montaña hasta el punto de ser detectable con un musiquero corrientillo ti-

rando a malote... ¿Acaso se trataba aquello de algo excepcional o sería posible captar alguna otra señal subterránea en otra parte de la banda?

Permítame ahora el lector abrir un pequeño paréntesis en este relato y vayamos unos cuantos años atrás en el tiempo. Allá por el año 2005 fui invitado a colaborar en la campaña estival de exploración espeleológica internacional que se desarrollaba en los Picos de Europa, en Asturias. Entre las actividades habituales, se dedicaba un especial esfuerzo a explorar una sima de más de 1.000 metros de profundidad descubierta en las inmediaciones de Peña Castil. Para facilitar las tareas de exploración a tan gran profundidad se había instado un campamento permanente intermedio a -600 metros. Desde el campamento intermedio se establecía comunicación con la superficie una o dos veces al día a una hora convenida, empleando unos radiocomunicadores de BLU que operan en la frecuencia de 87 kHz³⁴⁵ (LF). De aquella experiencia recuerdo que la calidad de la señal de aquellos transceptores era realmente marginal, resultando muy difícil para mí lograr entender al corresponsal. Su voz era perceptible a duras penas entre el ruido de fondo y con una dificultad añadida: la fuerte interferencia producida por el sistema de radionavegación LORAN, apenas a unos kilociclos de distancia de nuestra frecuencia de operación.

Volviendo al presente, y como cualquiera puede apreciar, la frecuencia de 87 kHz está muy, pero que muy, lejos de la banda de *broadcast* de Onda Media, cuyo margen de frecuencia transcurre alrededor del megahertzio. Pero a pesar de ello allí estaba yo, doce años después, de nuevo bajo tierra y con la inocencia de un infante, pretendiendo *escuchar* alguna señal de radio en Onda Media a casi ochenta metros bajo tierra. Y fue entonces cuando sonó la campana...

Aquella señal inicial apenas perceptible fue solo el principio. Recorriendo el dial tecla a tecla; se recibían otras señales de



Ensayo de comunicaciones cavidad-superficie en Onda Corta

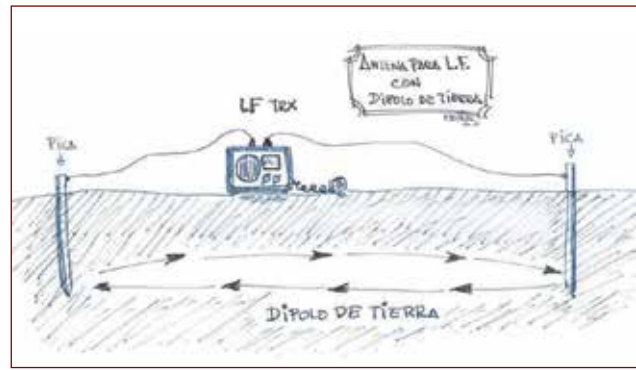
radiodifusión a lo largo de toda la banda. Y estas últimas ya con mucho mayor nivel y claramente inteligibles. Así que abrí la libretita de campo y fui anotando nerviosamente con el lápiz horas y frecuencias. Alguna transmisión parecía repetirse en diferentes frecuencias del dial. Posteriormente, ya de vuelta en casa, tendría ocasión de comprobar que esta multiplicidad se debía a la retransmisión del partido de fútbol por los diferentes transmisores de OM de RNE⁶, desde sus centros transmisores en Coruña, Lugo, Pontevedra y Orense, todos ellos claramente detectables bajo tierra. Cualquier buen aficionado al fútbol se hubiese percatado de esto al instante, pero en aquel momento no era nuestro caso y, la verdad, tampoco estábamos preparados para aquel acontecimiento. Con la idea preconcebida de que, solo las señales de radio de onda extremadamente larga consiguen penetrar en el subsuelo y el hábito adquirido en la práctica espeleológica de permanecer incommunicados desde que entras en cavidad, hasta que sales de nuevo a superficie (no existen transceptores comerciales de 87 kHz, los pocos disponibles son escasos y costosos, y su manejo es ciertamente engorroso), el hecho de recibir claramente emisoras de

que la antena Sigmática era un mito (o más bien un *fake*), ya que reúne todas las cualidades para ello, aunque confieso que no llegué a perder del todo la curiosidad por construirla y probarla personalmente. En la actualidad mis reservas hacia la mítica antena Sigmática son mucho menores y si bien no dejo de cuestionarme todas las bondades que se le atribuyen, me inclino a pensar que tal vez, después de todo el artilugio funcione. Pero, ¿qué entendemos por “funcionar”? ¿Por qué todos aquellos que me han referido haberla probado la descartaron de manera tan discreta? ¿Tal vez se sintieron decepcionados? ¿quizá engañados por creerse ilusamente unas prestaciones irreales? Sospecho que la respuesta a todo esto se encuentra en el manejo de información parcial (por tanto, inexacta) y fuera de contexto. De ahí a la decepción solo hay un pequeño paso.



Testeando la antena de suelo en comunicaciones de superficie desde estación móvil

Sin ánimo de ser exhaustivo, voy a desgranar brevemente las principales características que se atribuyen a la antena Sigmática: empleada en el pasado por el ejército alemán, se instala bajo tierra y funciona por reflexión de las señales en el núcleo terrestre (!), ¿se lo creen? Comencemos por matizar un error muy extendido entre nuestro colectivo: «lo militar es bueno», pero debiéramos preguntarnos: «¿bueno para qué?». ¿A nadie se le ocurrido pensar que las necesidades de comunicación de campo entre diferentes unidades militares estén muy alejadas de las que nos interesan a los radioaficionados? El radioaficionado medio tiene como uno de sus objetivos habituales el DX; sin embargo, los requerimientos de una comunicación de campo entre unidades militares pueden ser diametralmente opuestas: establecer un canal de comunicación estable (sin variabilidad de propagación), punto a punto y con el alcance operativo justo para evitar la detección o interceptación de la comunicación. ¿Esto no les dice nada? ¿Y si después de todo el objeto principal de la misteriosa antena Sigmática ni siquiera fuese la comunicación punto a punto entre diferentes unidades, si no que se tratase tan solo de un instrumento científico para estudiar el subsuelo? ¿Podría cualquiera de nosotros afirmarlo o negarlo con seguridad?



Dipolo de tierra

Otro tipo de antena sigmática, que funciona en íntima interacción con el suelo, es el «dipolo de tierra». Básicamente consiste en dos picas metálicas separadas entre sí por y varias decenas de metros y clavadas firmemente en el suelo. Los dos polos de salida de antena se conectan mediante conductores simples a cada una de estas picas. El dipolo de tierra se viene empleando desde el pasado, con efectividad variable, en algunos sistemas de comunicación subterránea en VLF, como es el caso del mal avenidao sistema TEDRA^{15 16 17}.

¿Le suena la Snake-Antenna?¹⁸ ¿y la Grass-Wire?¹⁹ Dos nombres diferentes para un mismo concepto. Aquí la idea consiste en desplegar aleatoriamente un radiante de longitud variable sobre el césped del jardín y conectarlo directamente al acoplador de antenas. Además, necesita imperiosamente una contra-antena. Para ello precisa clavar profundamente en el terreno una pica metálica hasta obtener buena conductividad o, si ello no es posible, desplegar unos cuantos metros más de conductor en la superficie a modo de contra-antena hasta que todo el sistema funcione. Debo aclarar que encontré las referencias a la Snake Antenna y la Grass-Wire buscando información adicional por la web, una vez vistos los buenos resultados que estábamos obteniendo, testeando varios prototipos de la WormAnt en comunicaciones de superficie, puesto que nuestro primer interés, no lo olvidemos, eran las comunicaciones subterráneas. Sin duda el trabajo más completo e interesante es el artículo de K3MT, analizando el comportamiento de su Grass-Wire y calificándola como un radiante con muy bajo ángulo de salida, apto incluso para el DX transcontinental. Recomiendo al lector una lectura detenida de tan interesante trabajo. En los siguientes enlaces^{20 21} puede el lector ampliar información al respecto.

WormAnt: el concepto táctico



Modelado CAD de prototipo

Sin duda la necesidad es la madre del ingenio. Tras constatar la capacidad de las frecuencias de HF para penetrar decenas de metros en el subsuelo, sentí la necesidad de explorar sus posibilidades prácticas como medio de comunicación en la actividad espeleológica. Decidí comenzar por la opción más difícil: el extremo superior de HF; debido a la facilidad práctica de disponer de equipos de CB económicos y de tamaño muy reducido. Además, tenía la intuición de que el máximo alcance de penetración que pudiese lograr en 27 o 28 MHz podría ser superado fácilmente cambiando la banda de operación a cualquier otra de HF con una frecuencia más baja, como verificamos posteriormente.



Construcción de diversos prototipos para HF y MF

El verdadero desafío que tenía ante mí era la antena. Ninguna solución al uso en el campo de la radioafición o comunicaciones de superficie resultaba factible; antenas de excesivo tamaño diseñadas para operar en espacio libre y entornos despejados, de montaje engorroso y muy sensibles a la desintonización debido a la influencia de objetos próximos. Tal vez las antenas de aro pudiesen representar una alternativa, pero resultan poco manejables en espacios confinados y engorrosas de transportar debido a su volumen. La opción de dipolo de tierra, mencionado antes, tampoco resulta práctico, tanto por su tamaño (desplegar una línea de 50 metros bajo tierra resulta inviable en la mayoría de nuestras pequeñas cavidades), como por la dificultad manifiesta, de clavar las picas en terreno rocoso. Al no encontrar entre las soluciones existentes ninguna libre de inconvenientes para mi propósito, no tuve más opción que diseñar y construir algo específico partiendo de cero. Como el papel lo resiste casi todo, opté por ser muy exigente con los requerimientos iniciales al abordar el diseño de un radiante verdaderamente "táctico" para comunicaciones subterráneas:

- ▶ Fiable, simple y ligero.
- ▶ Compacto y robusto, resistente a maltrato accidental.
- ▶ Resistente al polvo, agua y barro. Resistente a inmersión ocasional en agua o nieve.
- ▶ Funcional en cualquier condición climática (viento, nieve, hielo, etc.).
- ▶ Utilizable suspendido a mitad de un gran pozo.
- ▶ Sin contra-antena, ajustes de campo ni instalación de anclajes o soportes.
- ▶ Visualmente discreto y que no estorbe el desempeño de otras actividades.
- ▶ Cobertura completa de banda sin de reajustes y sin necesidad de acoplador.
- ▶ Buena adaptación al transmisor.
- ▶ Sin proceso de montaje/desmontaje: desplegar y operar.
- ▶ Manejo total con guantes y sin piezas sueltas que puedan extraviarse.
- ▶ Utilizable por personas sin habilidades especiales o conocimientos técnicos.

Desconocía si llevar a la práctica algo con estas características sería factible. En caso de no ser posible, ya tendría tiempo más adelante de ir restando prestaciones, implementando solo aquellas más necesarias. Llegado a este punto, puedo adelantar al lector que la resolución del problema fue posible aplicando un enfoque de diseño poco convencional, dejando a un lado aquellos aspectos clásicos que habitualmente tomamos como posición de partida al acometer el diseño de una antena. Acepté el desafío, no como un diseño de antena, si no como el de un transductor con el cual in-

yectar y recuperar energía electromagnética en el terreno. De ahí mi preferencia por denominar al objeto del proyecto como «dispositivo electromagnético» en lugar de «antena». El foco del concepto WormAnt fue desde el principio la eficacia, materializando en un dispositivo físico las prestaciones y requerimientos expuestos.

WormAnt: primeros ensayos



Prototipo 100 % waterproof WormAnt D 10-11-12 "SEAL", para investigar comunicaciones subterráneas en bandas de 10, 11 y 12 m

Los primeros prototipos WormAnt fueron diseñados para realizar ensayos en 27 MHz (CB), por la disponibilidad de equipos de esta banda con un tamaño cómodo para uso subterráneo. El caso es que, debido a cuestiones de agenda, los ensayos de campo superficie-cavidad se iban postergando, así que convencí al bueno de Fity, EA1HBX, para realizar un simple test de los prototipos en superficie. La distancia inicial fue más bien modesta, tan solo 1,5 km, pero la comunicación se realizó satisfactoriamente, en los modos de FM y AM, con equipos homologados de CB, o sea en QRP. Recuerdo al lector que no hablamos de un radiante instalado a baja altura, si no en contacto directo con el suelo, de modo que esperábamos una mayor dificultad en la comunicación, debido a pérdidas de suelo, atenuación o dispersión de señal o vaya usted a saber qué. Pero las señales eran muy fuertes, así que resolvimos repetir el ensayo el siguiente fin de semana con un objetivo mucho más ambicioso: salvar 25 km de distancia.

De nuevo logramos comunicar con las WormAnt desplegadas en contacto con el suelo. En esta ocasión usamos equipos de CB multimodo. La señal en AM y FM era apreciablemente menor, pero en SSB la comunicación era perfecta. El caso es que ya disponíamos de un prototipo para la banda de 40 metros, y también en esta banda logramos una comunicación perfecta en SSB. La sorpresa fue mayúscula cuando EA1HBX fue requerido durante el QSO de prueba por un colega del distrito 5²². Las WormAnt no solo se mostraban utilizables para comunicación táctica de superficie a corta distancia si no que ¡podían atravesar la península! ¡y en QRP! Este acontecimiento sirvió para redefinir nuestras prioridades inmediatas, encaminando los siguientes ensayos a investigar las posibilidades de los prototipos WormAnt como antenas tácticas de campaña en HF.

Después de lo visto, y para para verificar el buen comportamiento de la WormAnt en una actividad de campo real, no podíamos por menos que activar un vértice^{23,24}. El tándem Yaesu FT-817/WormAnt superó nuestras expectativas activando el VGOU-79. ¡Incluso con el día lluvioso y el suelo encharcado la comunicación con Ceuta era clara y estable! De aquella actividad quisiera destacar algo que llamó poderosamente mi atención: durante la activación empleamos dos transeptores (FT-817) uno en 40 m y el otro adicional en 20 m, cada uno con su respectiva WormAnt.



Antena se suelo en actividad HAM convencional (activación vértice VGOU-079 en QRP, QSO EA1<->EA9)

A pesar de encontrarse desplegadas en paralelo y a no más de unos cuatro metros de distancia, la interferencia entre ambas estaciones era inapreciable. Es decir, no observábamos desensibilización ni "barbas" en 20 m al operar simultáneamente en 40 m, y viceversa. A no ser que sintonizase en 20 m la frecuencia armónica exacta de la transmisión en 40 m, no te enterabas de la transmisión de la estación vecina. Posteriormente, en una actividad posterior, pudimos apreciar este mismo efecto entre las bandas de 80 y 40 m. Me parece un fenómeno interesante que merece ser investigado un poco más.



Unidades WormAnt B40 "SOTA"

Animado por los buenos resultados de estas experiencias, desarrollé una variante optimizada para actividades tipo SOTA, más ligera y eficiente desde el punto de vista radioeléctrico, y que eventualmente puede ser usada como una End-fed (a costa de una merma de la relación S/N). Ideada en principio para operación QRP, en los test de campo hemos constatado que admite eventualmente la operación con 100 W en SSB. El ancho de banda típico para una ROE<1:2 es menos amplio, pero en todos los casos que hemos testeado rondaba los 800 kHz. Es esta versión la que ahora me acompaña siempre en la mochila, y ya ha demostrado su desempeño en mis actividades outdoor a través de la montaña palentina, Picos de Europa e incluso desde el mismo nacimiento del río Tera, un pequeño y recóndito valle rodeado de montañas, a varias horas de camino de la civilización y sin cobertura de telefonía.



Testeando directividad con tres prototipos de antena de suelo en actividad de campo

A lo largo de estos meses he ido elaborado y testeando prototipos WormAnt para diversas bandas de HF, así como también para 160 m y radioescucha de *broadcast* en OM, optimizando las prestaciones mecánicas y eléctricas. El ancho de banda operativo en TX resulta excepcionalmente amplio²⁵ en todos los casos, ello hace totalmente innecesario el uso de acoplador o ajuste de campo en el radiante. Enchufar y operar: en unos segundos el sistema radiante está plenamente operativo, en cualquier circunstancia, en cualquier medio, en cualquier condición meteorológica. Como antena de recepción, donde no estamos limitados por la ROE, la sobresaliente característica S/N²⁶ proporciona una recepción satisfactoria incluso en las bandas adyacentes para escucha de *broadcast*, utilitarias, etcétera.

El último modelo en que he estado trabajando es una versión ultra-táctica para uso móvil en 40 m., al estilo de las antenas de móvil de CB. Debido a su pequeño tamaño he podido constatar que no se trata de una antena para DX, pero el objetivo va por otro camino: un ancho de banda en TX fuera de lo que encontramos en esta clase de antenas. Así, en un tamaño no mayor de 1,5 m. (al más puro estilo CB), sin necesidad de plano de masa y que cubra toda la banda en TX sin reajustes (BW>500 kHz @ ROE<1:2 en 40 m.) no encontramos muchas opciones disponibles, al menos no he encontrado algo satisfactorio con estas prestaciones que permita conectarse en la base del coche, en la bicicleta o la moto, sujetarse en una mochila, colocarse en un pequeño bote de pesca (no necesita plano de masa), o una embarcación de aventura como por ejemplo un kayak, para lo cual debe ser también necesariamente impermeable. Otro modelo con prestaciones similares para VHF se encuentra actualmente en el banco de pruebas.

En líneas generales, este es el *time-line* de los ensayos y actividades realizadas, tanto las de carácter netamente espeleológico, como las de radioafición:

- ▶ Septiembre de 2017. Escucha subterránea en Sima Aradelas (el Caurel, Lugo), de transmisores *broadcast* en AM de RNE y *broadcast* en HF de Radio Rumanía Internacional en 9,5 MHz.
- ▶ Diciembre de 2017. Primer test prototipo WormAnt en superficie; banda de 11 metros, 1,5 km. Ensayo de comunicación PMR intracavidad y recepción multibanda en el subsuelo en OL, OM, HF y VHF (*broadcast* FM comercial); Cueva de Arcoia (el Caurel, Lugo).
- ▶ Enero de 2018. QSO en 11 metros: 25 km; QSO en 40 metros



Prototipo WormAnt "TMC" D40 para montaje en vehículo

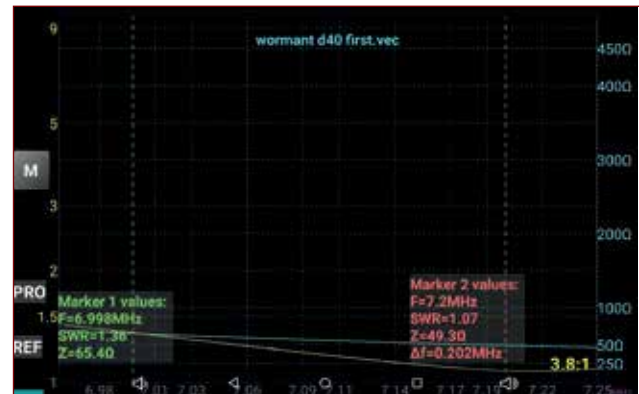
EA1HBX-EA5.

- ▶ Febrero de 2018. Activación vértice VGOU-079 en 40 y 20 metros.
- ▶ Marzo de 2018. QSO transatlántico en 11 metros España-Brasil²⁷.
- ▶ Abril de 2018. Test comunicación en 11 metros: Cova da Moura-San Trocadero.
- ▶ Mayo de 2018. Presentación primeros prototipos WormAnt en el EA1RKF, Fene. / Test de comunicación en 11 m: Pala del Cabezo, el Bierzo.
- ▶ Junio de 2018. Sota en Peña Trevinca y test desde el valle de Vega de Tera, Zamora.
- ▶ Julio de 2018. Sota en Picos de Europa: Peña Castil.
- ▶ Septiembre de 2018. Ensayo de comunicación cavidad-superficie en 40 m: Cueva Rey Cintolo, (Mondoñedo, Lugo); escucha desde Sala Apóstoles de señales RTTY y de la estación EG1SAC, desde Valladolid.
- ▶ Octubre de 2018. Ensayo de comunicación táctica con la WormAnt sumergida en el río Miño²⁸/Ensayo de comunicación en 11 m en Pala Silverto, el Bierzo.
- ▶ Noviembre de 2018. Ensayo comunicación cavidad-superficie en Cueva Rey Cintolo, Lugo
- ▶ Febrero de 2019. Test de recepción de banda extendida en superficie desde Panamá, Orense.
- ▶ Marzo de 2019.- Test de comunicación intracavidad en PMR y SSTV cavidad-superficie en 40 y 11m. en Pala del Cabezo, el Bierzo. /Comunicaciones en MF y HF en las minas de Brués, en 160, 40 y 11 m./Test en el Concurso CQ WW WPX SSB en 40 m. desde Mondoñedo, Lugo, con modelo WormAnt SOTA.
- ▶ Abril de 2019. Test de SSTV en minas de Brués, en 160 y 40 m.
- ▶ Mayo de 2019. Test de campo del prototipo de 80 metros mejorado: QSO con HB9CVQ. /Test del modelo optimizado para SOTA desde la montaña palentina en QRP. /Primer test de campo del modelo WormAnt TMC para móvil²⁹.
- ▶ Junio de 2019. Ensayo de comunicación cavidad-superficie en Sima Teixeira, Lugo, en 160, 80, 40, 11 y 10 m^{30 31 32 33 34 35 36 37}.
- ▶ Julio de 2019. Test en 80 m. La Lanzada (Pontevedra)- A Pastoriza (Lugo) con EA1FNG.
- ▶ Diciembre de 2019. Ensayo comunicación Cueva de Cornatel, en el Bierzo. Fondo de cavidad-superficie. SSB en 28 MHz, CB, 40 y 80 mts. Transmisión y recepción de SSTV fondo de cavidad-superficie con EA1HTW y EA1HGL.

Conclusiones

Con las diversas y variadas experiencias acumuladas a lo largo de estos meses he podido constatar lo siguiente:

- ▶ Primero; las comunicaciones subterráneas (cavidad-cavidad y cavidad-superficie) en HF son factibles.
- ▶ Segundo; una antena de HF en contacto directo con el suelo es perfectamente utilizable en comunicaciones terrestres y con una eficacia muy difícil de alcanzar por otros tipos de antena.



WormAnt D40: medida de campo con VNA

Personalmente no creo que haya nada en estas experiencias que contravenga las leyes de la física o las ecuaciones de Maxwell. Desconozco si tal cosa es posible y la verdad, para el caso, tampoco me preocupa gran cosa, no les voy a mentir. De todos modos, intentando encontrar una mínima base racional de la cual prender los resultados expuestos, me aventurara a compartir con ustedes mis impresiones, no exentas de subjetividad y claramente matizables y discutibles. Es más, así debiera ser.

Desde la publicación y difusión de los primeros vídeos con experiencias positivas de la antena de suelo, nos ha resultado bastante entretenido leer y escuchar la controversia y las diversas opiniones que se han generado. Muy abundantes los argumentos —principalmente teóricos— acerca de por qué esto o aquello no es posible, o por qué una cosa no debiera funcionar. Todos esos argumentos, en esencia, no son incorrectos, aunque hemos visto que en la práctica no siempre se cumplen. En cambio, no hemos hallado apenas, entre la amplia cosecha de opiniones, argumentos que alcancen a explicar, aun de pasada, por qué en la práctica sí funciona. Como radioaficionado sospecho que la sorpresa y escepticismo que pueden generar los hechos expuestos obedecen a que, en general investigamos poco o muy poco en realidad. Cuando digo investigar me refiero a ensayar cosas nuevas, a veces absurdas o ingenuas, disparatadas incluso. Porque experimentar no solo consiste en recorrer otra vez el camino que otros hicieron antes, si no en abrir caminos nuevos. También por simplificar asumimos como dogmas inamovibles las opciones categóricas extremas: o es blanco o es negro, y por ello no reparamos en la amplia y variada gama de grises, tan rica de matices, que entrelaza ambos extremos. No perdamos de vista que el científico no es una persona, o un título, o un cargo... es un método, y cualquiera de nosotros tiene el privilegio de aplicarlo con todo el rigor que quiera o sea capaz.



WormAnt D80: medida de campo con VNA

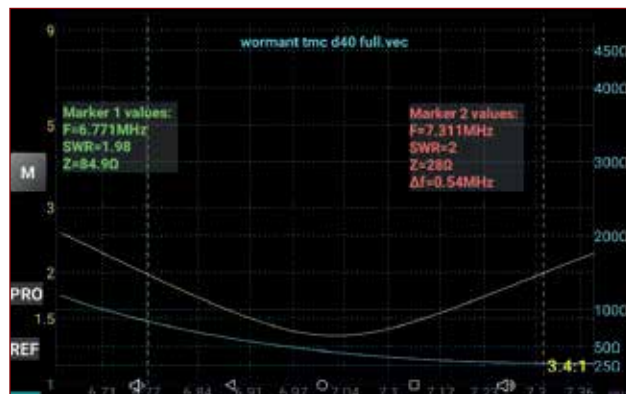
En líneas generales asumo como cierto que la atenuación de las ondas electromagnéticas, al atravesar el subsuelo, aumenta conforme disminuye la longitud de onda. Es decir, a mayor frecuencia, menor penetración. Lo hemos comprobado en nuestras actividades (sin embargo, en un caso concreto, teníamos mayor nivel señal en 40 metros que en 160, curioso, ¿verdad?). La atenuación en HF es mayor que en MF o en LF, sin embargo, que exista atenuación no significa que la señal desaparezca por completo, significa tan solo que el nivel de la señal decrece. Lo importante es que, en tanto y en cuanto dispongamos de un nivel de señal suficiente para establecer comunicación, la atenuación de la señal a través del terreno no importa. Es así de simple.



WormAnt D10-11-12 "SEAL": medida de campo con VNA

En igualdad de condiciones lograremos una comunicación subterránea a mayor profundidad empleando frecuencias de LF con respecto a la HF. Encontramos este principio repetido una y otra vez en libros y publicaciones respetables. El problemilla que arrastra este principio es que en la vida real (es decir, no en un ensayo de laboratorio, si no en una actividad de comunicaciones de campo auténtica), la igualdad de condiciones rara vez existe. Entre otros, el principal elemento de desigualdad es la antena. Lo ilustraré con un ejemplo. El malogrado sistema Tedra se diseñó para una frecuencia de operación alrededor de 70 kHz. Empleaba como sistema radiante un "dipolo de suelo" consistente en dos picas metálicas clavadas en el suelo y separadas en el mejor de los casos unos 50 metros. A través de esos 50 metros de tierra/roca que separa las dos picas metálicas, la corriente de RF cierra el circuito tal y como haría a través de una resistencia de carga. A primera vista no parece una implementación muy eficiente. Pero aunque el terreno entre las dos picas no ofreciese pérdidas y fuese un conductor ideal la longitud total del dipolo de suelo —50 m— (aunque resulta una dimensión considerable cuando hay que instalarlo en un entorno confinado), resulta un tamaño ridículo en comparación a la longitud de onda que usa el transceptor, la cual ronda los 4 km. ¿Esto no les sugiere nada? Para que se hagan una idea, es como si para operar en la banda de HF de 40 m usásemos un dipolo de tan solo 40 cm de punta a punta. La efectividad de la LF en cuanto a su mayor capacidad de penetración se malogra mediante el empleo de unos sistemas radiantes perfectamente ineficientes. Esta ineficiencia se manifiesta por partida doble, ya que el dipolo de tierra es usado como antena de emisión y recepción por ambos corresponsales, en superficie y en el subsuelo. Sin embargo, en HF y con menor despliegue práctico (un dipolo de media onda para la banda de HF de 40 metros no ocuparía más de 20 metros de longitud en el peor de los casos), nos movemos en ordenes de la longitud de onda y sabemos que ahí obtenemos sistemas radiantes altamente eficientes. Esta alta eficiencia en las antenas compensa holgadamente la mayor atenuación práctica que puede experimentar la señal de HF a través del subsuelo.

En septiembre de 2018, durante una actividad de espeleología y desde el interior de la "Sala de los Apóstoles" al fondo de la cueva del Rey Cintolo (Mondoñedo, provincia de Lugo), recibí claramente la señal de mi corresponsal —EA1HBX— transmitiendo desde el exterior en la banda de 40 m. Usamos antenas WormAnt en ambas estaciones, cavidad y superficie, y tan solo 5



WormAnt TMC D40: medida de campo con VNA

vaticos de potencia de transmisión (transceptores portátiles Yaesu FT-817ND). Desde la boca de la cueva, ubicada en la ladera norte del monte, hasta nuestra ubicación subterránea hay unos 125 m. de galerías sinuosas, algunas de ellas muy estrechas. Por encima de nosotros teníamos unos 150 metros de terreno hasta la superficie. Pero la proyección recta desde nuestra ubicación subterránea hasta la ubicación de EA1HBX, en la ladera suroeste de la montaña, representaba salvar un trayecto en línea recta de unos 550 metros a través del terreno, compuesto no solo por el lentejón calizo que dio origen a la famosa cueva, sino también por el típico terreno húmedo lucense de monte y pastos, probablemente con mayor absorción de señal. En las condiciones descritas, recibí perfectamente a mi corresponsal en SSB. También pude escuchar claramente numerosas estaciones de RTTY (sí, había concurso ese día...), una de las cuales operaba justo en nuestra frecuencia de ensayo, bloqueando a EA1HBX la recepción de mi señal en la superficie con señales de 9+20 dB unos cuantos kHz arriba y abajo. Tras la recepción subterránea satisfactoria de la transmisión de EA1HBX, así como diversas señales de RTTY y CW, me dediqué a explorar un poco la banda unos kHz más arriba de la frecuencia acordada para el ensayo. Entonces pude recibir claramente desde allí mismo las llamadas de la estación EG1SAC, realizando una activación³⁸. De regreso en casa, durante los días siguientes, contacte vía correo electrónico con el operador de la estación EG1SAC, el cual me confirmó que en el momento de mi recepción subterránea de su llamada operaba desde Valladolid (!) y que durante la actividad empleó como antena un dipolo multibanda en V invertida (no precisamente bien orientado hacia nosotros) y unos 80 o 90 W de potencia. ¿Se lo creen? yo también, ¡estaba allí!



Al no requerir plano de masa, el prototipo de vehículo resulta muy versátil

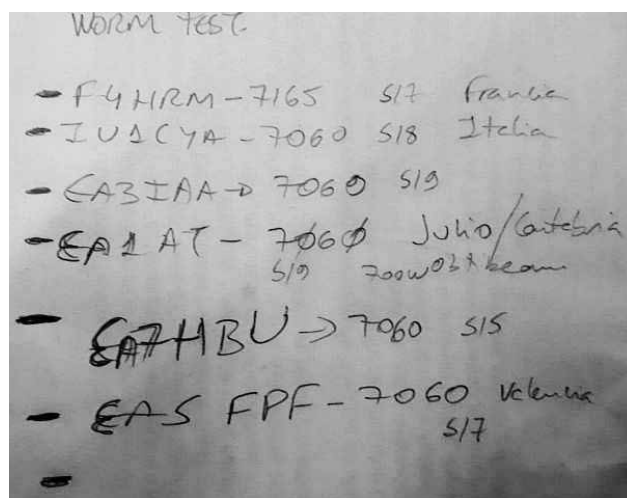
Con respecto a la operación táctica en superficie y las posibilidades de comunicación en HF a corta y larga distancia con un radiante desplegado directamente sobre el suelo, me remito al estupendo artículo de K3MT acerca de la Grass-Wire. Su detenida lectura ayuda a comprender que, dentro de la variabilidad natural de las características geológicas y eléctricas del terreno, desde el punto de vista electromagnético el suelo se nos presenta como un dieléctrico complejo con su particular índice de refracción, y en cuya interfase aire-suelo aparecen todos los fenómenos físicos característicos de las ondas: refracción, reflexión, difracción, interferencia y, ¿propagación? Además, y puesto que en este caso estamos generando el campo electromagnético exactamente en la zona de frontera aire-suelo no puedo dejar de pensar en la probabilidad de la aparición de fenómenos cuasi ópticos de confinación y propagación de la onda a lo largo de esa interfase. Este es un fenómeno bien conocido que ocurre cuando la onda atraviesa con determinado ángulo³⁹ la unión de dos medios que presentan diferente índice de refracción, y en ello se basa del funcionamiento de la fibra óptica, por ejemplo. También han tenido su aplicación en el pasado en líneas de transmisión para señales de UHF y microondas⁴⁰ y aun se emplea actualmente como medio de transmisión en el rango de los THz.

Aquel acontecimiento inicial al recibir emisoras de radio-difusión en OM y HF a varias decenas de metros de profundidad en la Sima Aradelas, fue el punto de partida para una sucesión de variados ensayos que me han llevado a través de una actividad de investigación fascinante, y en la cual todavía estoy inmerso. La poca o nula información de base disponible, hace que esta tarea se vaya desarrollando de una forma fundamentalmente empírica, y que no sería posible sin la generosa colaboración de buenos amigos, tanto espeleólogos como radioaficionados. Tenemos ante nosotros un amplio campo de experimentación con las antenas de suelo en comunicaciones convencionales, sin menoscabo de todo lo que, como colectivo y con esas mismas experiencias, podamos aportar en el campo de la comunicación subterránea en HF, ya que parece un terreno muy poco o nada explorado. Le animo a realizar sus propios ensayos y pruebas con la antena de suelo. Si siente curiosidad puede comenzar satisfaciéndola con algo realmente simple: investigar un poco la Grass-Wire (siga los enlaces indicados más arriba en este artículo). Solo necesita unos metros de jardín en los que desplegar un cable, una pica firmemente clavada en el suelo o una sencilla contra-antena y darle un empujoncito al acoplador en su próxima actividad de radio, como haría con cualquier otra antena convencional. Seguro que descubre muchas cosas sorprendentes para contarnos. Leeré con gran interés sus experiencias si tiene a bien compartirlas, ¡no se corte en divulgarlas!



Antena de suelo desplegada en terreno nevado

Para terminar, solo quiero decir que probablemente la antena de suelo no pueda calificarse como la más idónea para DX. Si este es su principal área de interés puede considerarse afortunado, por que dispone de un extenso abanico de sistemas radiantes donde elegir en el sector comercial. Afortunadamente, la actividad de radioaficionado en las ondas no se limita a la práctica del DX, sino que se enriquece con muchas otras facetas, como por ejemplo la extensa variedad de actividades portables que cada fin de semana pueblan nuestras bandas. Aquí el concepto a emplear es sin duda «antena táctica». Si busca un sistema radiante esencialmente eficaz en situaciones excepcionales como por ejemplo: antena de reserva que le permita estar en el aire en apenas unos segundos en caso de colapso de su instalación de antenas fijas, o una antena habitual para actividades portables como SOTA, vértices, Protección Civil, militar, expediciones humanitarias, emergencias, etc. Utilizable prácticamente en cualquier circunstancia y condición meteorológica (incluso en áreas de aterrizaje/despegue de aeronaves), virtualmente invisible, sin instalación, sin acoplador, sin ajustes, impermeable y sumergible... tanto si quiere solo desplegar y operar en apenas unos segundos, seguro que encontrará interesante el concepto WormAnt.



Anotaciones de EA1HBX testeando la antena de suelo desde Orense en operación HAM convencional

Agradecimientos

A los espeleólogos del GES-CAM de Orense y del C.M.Celtas de Vigo. A los radiomakers EA1DBB, EA1HTW, EA1HGL, EA1GDH, EA1HVT, EA1HXG, EA1YK, EB1AJP, EB1DGH por toda la colaboración y ayuda prestada. Y un reconocimiento especial a EA1HBX por su participación y apoyo constante en tantas jornadas de pruebas y ensayos. ●

Notas

1. GES.CAM: Grupo Exploraciones Subterráneas Club Alpino Manzaneda. Twitter: @ges_cam web: <http://gescam.radiomakers.org>
2. ELF: Extra Low Frequency, radioseñales de frecuencia extremadamente baja, desde 0 a 3 kHz.
3. Transceptor «Nicola» de procedencia francesa. Existe otro desarrollo similar de procedencia británica, el «Heyphone», ambos 100% compatibles entre si.
4. Heyphone: <http://bcra.org.uk/creg/heyphone/index.html>
5. Nicola: https://www.facebook.com/AssociationNicola/?_fb_noscript=1
6. Estaciones de Radio Nacional de España en Onda Media recibidas, Sima Aradelas: (-70 m profundidad, 9 septiembre de 2017, a partir de 18:54 hrs (hora EA), 639 kHz (RNE Coruña); 801 kHz (RNE Lugo); 855 kHz (RNE Pontevedra/Ponferrada); 972 kHz (RNE Lugo); 1.107 kHz (música ?); 1.350 kHz (interferencia fuerte); 1.503 kHz (Radio 5 Lugo) <https://youtu.be/K5JB8CAeMXk>
7. Precisamente por ello las estaciones de radiocomunicación amateur juegan un importante papel en el ocio y bienestar emo-

cional de las tripulaciones espaciales.

8. Concretamente información en tiempo real desde el exterior, no grabaciones, por ejemplo: noticias actuales, partes meteorológicos, avisos y alertas, etc.

9. Incluso grabamos un pequeño vídeo dado lo excepcional del acontecimiento: <https://youtu.be/bRyHpeeyH1A>

10. <https://www.qsl.net/cx1ddr/sigmatika.htm>

11. <https://ea5nd.com/wp-content/uploads/2017/11/Antena-Sigm%C3%A1tica.pdf>

12. Sobre la antena ELPA: <http://www.hflink.com/antenna/elpa/>

13. <http://lu6etj.host-argentina.com.ar/lu6etj/tecnicos/sigmatika.htm>

14. <http://www.lu8dbj-bbs.com.ar/informa1.html>

15. Sobre el sistema Tedra: <http://rover0.blogspot.com/2010/01/para-que-sirven-las-patentes.html>

16. <http://www.sedeck.org/boletin-sedeck> (boletín nº8, pag. 42-46)

17. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2009013374&tab=PCTBIBLIO>

18. Sobre la Snake Antenna por GM6MEN: <https://www.qsl.net/gm6men/>

19. Sobre la Grass Wire por K3MT: http://f5ad.free.fr/Liens_coupes_ANT/G/K3MT%20Antenne%20gazon.htm

20. <http://tm1o.free.fr/Beverage/On-Ground.pdf>

21. <https://kh6jrm.blogspot.com/2014/06/simple-ham-radio-antennas-on-ground.html>

22. Primer QSO transpeninsular WormAnt EA1-EA5 Enero 2018: <https://youtu.be/HbDyDexIzWs>

23. Activación VGOU-079 Febrero 2018: <https://youtu.be/O-mt9hagM8A>

24. Activación VGOU-079 Febrero 2018: <https://youtu.be/1JWO4owsqZ8>

25. Por ejemplo, el modelo para 40m. proporciona, según el entorno, alrededor de 1 MHz de ancho de banda utilizable en TX sin acoplador.

26. S/N o relación señal/ruido, en lugar del nivel de señal bruto captado por la antena, determina en la práctica el grado sensibilidad que permite detectar señales débiles.

27. QSO transatlántico España-Brasil en 11 metros en QRP: <https://youtu.be/MKxvwbqnEIO>

28. Vídeo operando con la antena sumergida: <https://youtu.be/HiPDontyNQQ>

29. Vídeo comparativa WormAnt TMC (móvil)-WormAnt STA (suelo): <https://youtu.be/uFSxSAjcQTs>

30. Sima Teixeira, interior cavidad, parte 1: https://youtu.be/_qHnxSjjKMY

31. Sima Teixeira, interior cavidad, parte 2: https://youtu.be/a_dM9fdmHzY

32. Sima Teixeira, superficie, parte 1: <https://youtu.be/cd4PI74qRFQ>

33. Sima Teixeira, superficie, parte 2: <https://youtu.be/k7iGSjq-YmU>

34. Sima Teixeira, superficie, parte 3: <https://youtu.be/u35XV0u6nRo>

35. Sima Teixeira, superficie, parte 4: <https://youtu.be/m0fV4BA1pIA>

36. Sima Teixeira, superficie, parte 5: <https://youtu.be/2r-oYc4Uw-4>

37. Sima Teixeira, superficie, parte 6: <https://youtu.be/1IJT8en-emA>

38. EG1SAC, Diploma Santo Ángel Custodio.

39. Véase ángulo crítico (http://webs.ucm.es/info/giboucm/Download/angulo_critico.pdf) y ángulo de Brewster (https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_de_Brewster).

40. Véase "Goubau line", o G line, consiste esencialmente en un conductor recubierto de dieléctrico. Como si a un trozo de cable coaxial le retiramos completamente la funda exterior y la malla metálica, dejando tan solo el conductor interior y el dieléctrico. https://en.wikipedia.org/wiki/Goubau_line