

Antenas enfasadas

Julio Isa, EA3AIR

La antena Yagi, o más técnicamente antena de elementos parásitos, es el montaje que permite una mayor ganancia de antena en función del volumen ocupado. No vamos a entrar aquí en la discusión de sus virtudes, que son sobradamente conocidas, ni en si son mejores los elementos lineales, o los cuadros o en delta. Sea cual sea su forma, el descubrimiento de Yagi ha hecho que ese tipo de antena sea la más utilizada, con amplia diferencia, de cuantas se emplean para conseguir ganancia y directividad.

Limitaciones de una Yagi

La antena Yagi de muchos elementos tiene dos limitaciones fundamentales: por un lado la limitación mecánica de la viga central que soporta a todos los elementos, y por otro las limitaciones de diseño.

A medida que añadimos elementos parásitos nos encontramos con que la viga de soporte debe ser cada vez más larga. Cuanto más larga es una viga, mayor tiene que ser su sección para soportar los mayores esfuerzos que debe aguantar. En teoría no hay problema con los materiales actuales para construir vigas de longitudes enormes, todos hemos visto las maravillas de ingeniería que suponen las grandes obras públicas, pero esas técnicas no pueden aplicarse a la construcción de antenas. La máxima sección que puede tener la viga de una antena Yagi viene limitada por la longitud de onda a que funcione la antena. La parte de elemento parásito en contacto con la viga debe ser menor de un $\lambda/2$ de la longitud de onda (λ), ya que si es mayor se compromete el funcionamiento del sistema. En 144 MHz esto supone que la viga debe ser de menos de 4 cm y en frecuencias superiores mucho menor.

Se puede recurrir a varios trucos mecánicos para reducir los esfuerzos sobre la viga, tales como los abarcones o los tensores, pero esos artilugios sólo actúan en un plano, el vertical. La propia disposición de los elementos parásitos impide la colocación de tensores o abarcones que limiten los esfuerzos en sentido horizontal. En presencia de fuertes vientos una Yagi muy larga se curvaría demasiado, pudiendo llegar a romperse.

Con estas limitaciones, y sin emplear materiales como el titanio o similares, el límite de longitud de una Yagi en 144 MHz debe estar sobre los 12 m, utilizando los mejores aluminios y una buena mecánica.

El problema de cálculo de los elementos de una antena se complica a medida que añadimos más y más elementos. Cuando tenemos más de 10, las relaciones entre ellos y de todos con el elemento excitado se vuelven muy complejas. Además, cuando ya se tienen muchos elementos en una antena es necesario añadir bastantes más para que la ganancia aumente apreciablemente.

En la figura 1 tenemos una gráfica de la ganancia teórica de una Yagi en función de la longitud de la viga expresada en longitudes de onda. Se hace así porque en las antenas Yagi largas el número de elementos es de unos 5 por longitud de onda de largo. El hecho de que una antena de $\lambda/3$ de largo tenga 14, 15 o 16 elementos sólo modifica el resultado final en una pequeña fracción de decibelio, siempre que el cálculo realizado para construirla sea adecuado. Cuando la antena es muy larga, los elementos más alejados podemos decir que están muy débilmente acoplados al elemento excitado, y parece que su eficacia disminuya.

La conclusión es bastante lógica: una vez se tiene una Yagi con suficiente ganancia y cuyas dimensiones resulten manejables es inútil seguir añadiendo elementos, vale más tomar varias iguales y apilarlas (o ponerlas en fase, o hacer una formación, que en castellano sería más correcto).

Distancia de separación

Cuando tratamos de poner antenas una al lado de la otra la primera pregunta es siempre ¿a qué distancia una de la otra?

Si las colocamos demasiado juntas sus respectivos elementos interactuarán entre sí, disminuyendo el rendimiento de cada antena y disminuirá la superficie del frente de onda que queremos captar, por lo que su ganancia final disminuye. Si las colocamos demasiado separadas estaremos utilizando una gran estructura de soporte sin ningún beneficio. Por tanto, lo lógico es utilizar la estructura más pequeña que permita obtener la máxima ganancia del apilamiento.

El problema de la separación tiene dos vertientes:

- Obtener la máxima ganancia posible (+3 dB)
- Supresión de lóbulos laterales

Máxima ganancia. En la figura 2 tenemos una antena encima de otra, a las que llega un frente de onda electromagnético que queremos recibir. Cada antena tiene un lóbulo de radiación determinado (lo suele dar el fabricante y si no hay que calcularlo haciendo mediciones). Si los dos lóbulos no se solapan, como ocurre en la figura 2A, cada antena extrae energía de dos superficies distintas del frente de onda por lo que el total será el doble (o sea 3 dB más) que una sola. Si aumentamos la separación no ganamos nada, ya que no aumentamos la superficie del frente de onda captado por las antenas (éstas no reciben fuera de su lóbulo de radiación).

Si ahora juntamos las dos antenas, ocurre lo que vemos en la figura 2B: las dos superficies captadas se solapan. Como la energía por unidad de superficie del frente de onda es fija el resultado es una menor superficie de captación y por tanto menos ganancia total.

Para calcular esas superficies se utilizan una fórmulas empíricas. Siempre he utilizado las que publicó William I. Orr, W6SAI, en su libro Beam Antenna Handbook.

Las fórmulas del cálculo parten de la apertura efectiva de la antena que viene dada por la fórmula

$$A = 0,13G$$

en la que A es la apertura en m^2 y G es ganancia de la antena sobre dipolo (en veces, no en logaritmos o decibelios).

A partir de esta fórmula se puede calcular la altura y anchura de esa apertura efectiva. Para antenas cuya apertura efectiva sea sensiblemente circular, y casi todas las antenas Yagi largas lo son ya que sus ángulos de radiación vertical y horizontal suelen ser muy parecidos, la fórmula que nos da el diámetro de ese círculo es

$$D = 2 \cdot \text{raíz cuadrada de } (A / \pi)$$

siendo D el diámetro del círculo en k.

Si aplicamos las fórmulas a nuestras típicas antenas de unos 16 elementos, a las que suponemos unos 13 dB sobre un dipolo (20 veces) tendríamos

$$A = 0,13 \times 20 = 2,6 \text{ m}^2$$

y por tanto $D = 1,8 \text{ m}$.

Expresado en metros para antenas de 144 MHz tendríamos 3,6 m de separación, que es la que siempre se da como mínima para ese tipo de antenas. Para no entrar en plagio no sigo copiando las fórmulas de W6SAI, pero recomiendo su lectura, ya que además de la separación permiten calcular la ganancia efectiva de la antena en base a sus diagramas de radiación. Además, si los ángulos vertical y horizontal del lóbulo de radiación son muy diferentes no sirve la fórmula que he dicho antes y hay que usar otras.

Supresión de lóbulos laterales. Hasta ahora sólo hemos hablado de los lóbulos principales y de optimizar la ganancia del lóbulo principal del apilamiento resultante. Sin embargo, la mayoría de antenas tienen lóbulos secundarios y no es seguro lo que va a pasar con ellos cuando se apilan varias antenas. Pueden aumentar, disminuir o aparecer lóbulos nuevos donde antes no había.

A los lóbulos laterales no solemos darles importancia, ya que en la mayoría de antenas suelen estar muchos decibelios por debajo del lóbulo principal. Sin embargo, al hacer un apilamiento puede ocurrir que esos lóbulos laterales sólo queden 10 dB por debajo del principal. Para hacer rebote lunar, o en zonas donde el ruido ambiental sea considerable, esos lóbulos laterales pueden ser un engorro ya que captarán ruido de direcciones no deseadas con muy poca atenuación.

La supresión de lóbulos laterales sólo puede hacerse por tanteo. Afortunadamente basta modificar unos pocos centímetros (en 144 MHz) la separación entre antenas para obtener resultados bastante espectaculares. Normalmente cuando un fabricante da unas dimensiones óptimas para realizar un apilamiento con sus antenas es de suponer que ha tenido en cuenta todos los factores incluido el de los lóbulos laterales. De todas formas es un buen campo para la experimentación, y no es raro oír entre los especialistas enconadas discusiones sobre el resultado de sus experiencias respectivas.

Puesta en fase

Hay una gran cantidad de métodos para poner en fase una formación de antenas, especialmente cuando hay muchas antenas. Entre radioaficionados lo más normal es que todas las antenas sean equivalentes ya que es el sistema que presenta menos dificultades de diseño.

Cuando se hace un arnés de puesta en fase que haga funcionar a todas las antenas por igual se deben cumplir tres condiciones:

1. La longitud de conexión entre el punto común de la formación y cualquiera de las antenas debe ser exactamente la misma.
2. El número de derivaciones que hay entre el punto común y la antena debe ser igual para todas las antenas. El sistema más sencillo de hacer derivaciones es que cada rama de la derivación se lleve la misma parte de la energía que las otras; si en una de las derivaciones hubiera conectadas más antenas que en las otras ya no podríamos decir que todas las antenas son equivalentes, las que estén conectadas a esa derivación recibirán menos energía que las otras.
3. Los dipolos deben estar conectados de forma que vistas todas las antenas desde un sitio fijo (por ejemplo, por detrás), la rama derecha de todos los elementos excitados esté conectada al mismo conductor del arnés de alimentación y el lado izquierdo al otro. Cuando se utilizan cables coaxiales, el problema se reduce a conectar el central a un lado (siempre el mismo) de todos los elementos excitados y la malla al otro lado de todos los elementos excitados. Con líneas de hilos paralelos hay que prestar especial cuidado a este punto, ya que es muy fácil equivocarse. Si se comete un error en este punto las antenas que queden invertidas estarán en contrafase respecto a las demás y se perderán un montón de decibelios. Si el error es simétrico respecto a la estructura de la formación, el resultado será un nulo precisamente en la dirección en que queremos que dé la máxima ganancia, ya que la radiación en esa dirección se anula totalmente.

Tipo de arnés

En todos los libros aparecen los típicos adaptadores para dos y cuatro antenas basados en las propiedades de la línea de transformación de cuarto de onda. En HF y en 50 MHz, donde las pérdidas de los cables coaxiales son muy pequeñas, el asunto no tiene mayor importancia; pero en 144 MHz y superiores no es una solución idónea. Un transformador de cuarto de onda funciona con una ROE más o menos eevada, según la transformación que realice. En VHF y superiores, los cables coaxiales normales tienen pérdidas apreciables incluso para longitudes cortas. Si además el cable trabaja con una ROE apreciable, esas pérdidas se verán incrementadas. Otro problema asociado a las líneas de transformación de $\lambda/4$ es que hay que cortarlas con mucha precisión a una longitud determinada, y en VHF ese es un problema relativo, pero en UHF y superiores unos pocos milímetros pueden hacer que el transformador no funcione adecuadamente.

El sistema ideal con cables coaxiales es utilizar un adaptador para dos o cuatro antenas de las que se venden comercialmente. Entre esos adaptadores y las antenas hay que poner longitudes iguales de cable de la misma impedancia que las antenas. Por tanto, los cables coaxiales trabajan sin ROE, lo que minimiza las pérdidas. Los adaptadores son en realidad líneas de cuarto de onda realizadas con tubos de cobre y dieléctrico de aire de la impedancia adecuada para efectuar la transformación. Sus pérdidas y su longitud son mínimas (el dieléctrico de aire es el que menos pérdidas tiene) por lo que, aunque trabaje con ROE, no introducirá pérdidas apreciables en el sistema.

Su funcionamiento es sencillísimo. Supongamos que vamos a enfasar dos antenas de 50 Ω (figura 3). Como el coaxial de conexión también tiene 50 Ω no realiza transformación alguna, por tanto el adaptador «ve» dos resistencias de 50 Ω en paralelo, o sea 25 Ω . Al otro extremo tendremos la bajada hacia la emisora, que suponemos también es de 50 Ω . Por tanto, raíz $(50 \times 25) = 35$ Ω . Necesitamos una línea de cuarto de onda de 35 Ω , pero como el adaptador está hecho con tubos basta elegir la relación de diámetros adecuada para conseguir esa impedancia «extraña».

En el caso de cuatro antenas caben dos posibilidades. La primera consiste en colocar todas las antenas en paralelo (12,5 Ω) y elevar esa impedancia a 50 Ω mediante una línea de 25 Ω . Sin embargo, esas impedancias tan bajas no son convenientes, ya que baja impedancia implica alta corriente, por lo que las pérdidas resistivas pueden empezar a ser un problema. Es mejor realizar un adaptador que adapte las antenas "dos a dos" pasando los 25 Ω del caso de dos antenas a 100 Ω mediante una línea de 50 Ω . El conector central de la figura 4 «verá» dos resistencias de 100 Ω en paralelo, o sea 50 Ω .

Para formaciones más grandes hay que hacer el acoplamiento por grupos de dos o cuatro y luego juntar los diversos grupos.

Es evidente que la utilización de cables coaxiales es muy práctica y queda siempre muy bien sujeto todo, ya que no hay problema para afirmarlo con cinta adhesiva a los diversos elementos de la estructura. Sin embargo no hay que olvidar que la línea de hilos paralelos sigue siendo el método más económico de obtener una conexión de bajísimas pérdidas; precisamente por sus bajas pérdidas puede trabajar con casi cualquier valor de ROE y puede adaptarse a cualquier impedancia por medio de lo que se denomina adaptador universal, que no es más que un trozo de la misma línea de hilos paralelos cortocircuitada en su extremo de forma que todo el sistema sea resonante (figura 5). El único problema que tiene es que es simétrica, por lo que para conectar un cable coaxial habrá que utilizar un simetrizador. Probablemente, lo mejor sea utilizar un balun de $\lambda/2$ onda hecho con el mismo cable coaxial que la bajada. Ese tipo de balun realiza una transformación de impedancias de 1:4, por lo que con cable de 50 Ω habrá que buscar un punto de 200 Ω en el adaptador universal. Esto se hace moviendo arriba y abajo el punto de conexión.

Para hacer una línea de hilos paralelos se puede utilizar alambre de cobre esmaltado de 1,5 a 2 mm de diámetro y realizar unos espaciadores a base de plancha de teflón de 1 m de grueso cortada en rectángulos de 3x1 cm y perforadas con dos agujeros separados 2 cm. Para que la

línea quede bien, lo mejor es taladrar todos los separadores a la vez; una vez cortados se apilan y se hace la perforación todos a la vez con la broca adecuada (figura 6). Los separadores se montan uno cada 25 o 30 cm, y la broca empleada para perforarlos debe ser tal que el hilo pase con cierta dificultad y los separadores se aguanten solos en su lugar. Si esto no es posible y los separadores quedan flojos, un poco de pegamento hará que los hilos se vuelvan rugosos y los separadores queden fijos en su lugar.

Este artículo se publicó en el número 55, Julio 1988, de CQ Radio Amateur