

INFORME UIT-R M.2026

**Adaptabilidad de la tecnología de banda lateral única con cero real
para las comunicaciones de datos en ondas decamétricas**

(2001)

1 Introducción

Las comunicaciones automatizadas en las bandas de ondas decamétricas aportaron una serie de soluciones innovadoras a los perennes problemas de los enlaces radioeléctricos en banda lateral única con cero real (BLU RZ), tales como los de selección de canal, funcionamiento autónomo e interoperabilidad. Estos sistemas exploran rápida y automáticamente un conjunto de frecuencias asignadas, escuchando tonos de módem que llevan sus distintivos de llamada. Los posteriores sistemas de establecimiento automático del enlace (ALE, *automatic link stablishment*) se desarrollaron después de intentar diversas soluciones en la industria y más tarde se ensayaron y confirmaron en el mercado [Johnson y otros, 1997]. El UIT-R está examinando la tecnología ALE que se registró en las normas MIL-STD-188-141A y FED-STD-1045. Una estación radioeléctrica con esta tecnología consta de un controlador ALE, un equipo radioeléctrico de banda lateral única (BLU) controlable y diversos dispositivos de transmisión tales como antenas, etc. Las estaciones automatizadas más modernas incluyen también módems de datos de gran velocidad en alta frecuencia, controladores de interconexión de red, etc.

El sistema BLU, desarrollado originalmente en el año 1910, se utiliza aún ampliamente en las radio-comunicaciones en ondas decamétricas [Maslin, 1987]. La BLU presenta la ventaja singular de que ocupa una banda estrecha, aunque es difícil mantener la transparencia de las señales recibidas al atravesar entornos con desvanecimiento. Para contrarrestar dicho desvanecimiento, la British Post Office desarrolló en los años sesenta el sistema Lincompex. En el proceso de demodulación, la BLU convencional, incluyendo el sistema Lincompex, requiere un circuito de control automático de ganancia (CAG) para restituir la degradación de amplitud y un oscilador variable para la sintonía fina de frecuencia. Sin estos dos circuitos, la señal detectada resulta muy degradada.

A fin de superar los inconvenientes de la BLU convencional, se introdujo con éxito en Japón [Daikoku y Suwa, 1988] el concepto de cero real, estableciendo la tecnología BLU con cero real (BLU RZ) para las bandas de ondas métricas y decimétricas. Se aprovecha que la BLU es uno de los métodos de modulación más ventajosos para utilizar el limitado espectro radioeléctrico de la forma más eficaz posible.

Previendo que la tecnología BLU RZ resultará eficaz para las comunicaciones de datos por enlaces radioeléctricos en ondas decamétricas, este Informe presenta con detalle dicha tecnología.

2 Tecnología BLU RZ

La tecnología BLU RZ es una combinación de dos técnicas de tratamiento digital de señales; la modulación BLU y la recepción de modulación de fase (MP).

2.1 Diseño del transmisor

Como la portadora tiene un papel fundamental en el proceso de detección de la señal BLU RZ, se adopta como señal de transmisión una señal BLU con portadora reducida.

2.1.1 Generación de la señal BLU

Para generar señales BLU hay tres métodos, el método del filtro, el método del desfase (deriva de fase) y el método Weaver [Sabin y Schoenike, 1987]. Entre ellos se selecciona el método del desfase, porque así puede generarse una señal BLU sin utilizar un filtro paso banda con características de atenuación aguda, lo que introduciría una degradación importante de la señal de información. No obstante, el método del desfase exige, para lograr una señal de información con precisión razonable, utilizar un transformador Hilbert que resulta algo difícil de fabricar en la práctica. Con el fin de evitar este inconveniente, conviene fabricar un transformador Hilbert de integración a gran escala utilizando la tecnología de tratamiento digital de señales.

2.1.2 Amplificador lineal de potencia

El método más sencillo para aumentar la intensidad de la señal recibida es aumentar la potencia del transmisor. Como resultado de ello pueden introducirse efectos espurios en el terminal de transmisión, lo que dará lugar a una polución adicional del espectro radioeléctrico. La realimentación en radiofrecuencia (RF) puede ser eficaz para reducir la distorsión de amplitud y de fase. No obstante, hay ciertas limitaciones en las técnicas de realimentación convencional en RF en las que una parte de la señal de salida de RF, representada en forma de cantidad escalar, se devuelve simplemente a la entrada.

Recientemente, se ha desarrollado con éxito una técnica de bucle de realimentación cartesiano en el que el nivel de realimentación se trata en el eje cartesiano ortogonal, como si fuese una cantidad vectorial, a fin de lograr un amplificador lineal para la señal radioeléctrica de banda estrecha en ondas métricas y decimétricas [Nagata, 1989]. Como el par Hilbert es inherentemente ortogonal entre sí [Hahn, 1996], la técnica de bucle de realimentación cartesiano se adapta fácilmente para la obtención del amplificador lineal de los sistemas BLU.

2.1.3 Anchura de banda de la señal de información

La anchura de banda de información en la BLU convencional va de 350 Hz a 2,7 kHz con una separación de canales de 3,0 kHz. A diferencia de la BLU convencional, la anchura de banda de información en la BLU RZ puede ampliarse hasta 3,4 kHz.

2.2 Diseño del receptor para evitar degradaciones de la de sintonía de portadora y mejorar la inmunidad contra los desvanecimientos

Como la BLU es sensible al sincronismo de la portadora y puede experimentar desvanecimientos intensos en entornos móviles, el proceso de demodulación de la BLU RZ introduce dos tecnologías nuevas para contrarrestar estos problemas.

2.2.1 Nuevo método de demodulación

La primera técnica consiste en un nuevo método de demodulación que utiliza los pasos por cero de las señales recibidas. El receptor BLU convencional emplea un circuito CAG y un oscilador variable (de gran estabilidad). Como estos circuitos limitan la calidad de la BLU convencional, la BLU RZ responde a un enfoque totalmente distinto para lograr una calidad de transmisión superior sin utilizar en el receptor estos circuitos perturbadores.

En 1977, el Dr. Benjamin F. Logan de los Laboratorios Bell, demostró, utilizando la teoría de funciones, que la información puede recuperarse, sin pérdida alguna, a partir de los pasos por cero de señales paso banda, tales como la BLU RZ [Logan, 1977]. Esto significa que no es necesario,

como en el receptor BLU convencional, recuperar la señal de información a partir de la envolvente y la fase de la señal BLU recibida; una señal de información puede recuperarse independientemente de la amplitud de la señal, como en la modulación de frecuencia (MF). No obstante, el Dr. Logan no demostró nunca cómo recuperar la señal de información a partir de los pasos por cero e indicó en su contribución que sería «difícil y no práctico» hacerlo. El método de demodulación BLU RZ ofrece una solución fácil y práctica para este problema. Los pasos por cero se expresan matemáticamente por ceros reales y no como ceros complejos; por esta razón la tecnología que aquí se describe se denominó BLU RZ, en honor a los logros académicos del Dr. Logan.

El nuevo método de demodulación de la señal BLU RZ hace que el receptor correspondiente sea drásticamente distinto de un receptor BLU convencional. El receptor básico BLU RZ consta de un potente limitador de amplitud, un discriminador de frecuencia, un integrador y un dispositivo de linealización. En primer lugar se procesa la señal recibida BLU con portadora reducida a fin de aumentar el nivel de la portadora y crear una señal BLU de portadora completa, es decir, la señal BLU RZ de la que se extraerá la información de paso por cero, únicamente en la componente de fase. A fin de detectar de forma precisa dicha componente de fase, debe eliminarse la variación de amplitud utilizando un limitador/recortador de amplitud. Se detecta la fase de la salida de este limitador utilizando un discriminador de frecuencia y un integrador. La señal integrada se procesa a continuación con un dispositivo de linealización que reproduce exactamente la señal de información transmitida. El circuito más importante de un receptor BLU RZ es el linealizador; este circuito complejo se reduce hasta el tamaño de un circuito integrado y se obtiene un funcionamiento preciso utilizando la tecnología más reciente de tratamiento de señales digitales.

En el proceso de demodulación BLU RZ recientemente desarrollado, la componente portadora se convierte siempre en una componente continua de las señales de información. De esta manera, el receptor BLU RZ se libera completamente de las degradaciones que causa una portadora mal sintonizada, es decir, las derivas de frecuencia y/o fase de la portadora. Dichas degradaciones suelen surgir en un receptor BLU convencional, por lo que se requiere un oscilador (de gran estabilidad) para reducir esta degradación.

2.2.2 Tecnología antidesvanecimiento

La segunda innovación es la introducción de la tecnología antidesvanecimiento. Como el efecto del desvanecimiento es multiplicativo, tanto la componente de amplitud como la de fase de las señales recibidas se degradan por los desvanecimientos intensos. Desafortunadamente, en la BLU convencional no se ha hallado ningún medio para compensar dicha degradación. Por el contrario, en el proceso de demodulación BLU RZ, se elimina la amplitud degradada utilizando el limitador/recortador de amplitud y se introduce un compensador MF aleatorio para eliminar la degradación de la componente de fase contaminada por los desvanecimientos.

Un compensador de ruido aleatorio MF que tiene una fase en la señal de salida totalmente independiente de la fase de la señal de entrada procedente de la antena resulta eficaz para la recepción por un sola rama. Cuando en la recepción BLU RZ se introducen dos ramas de diversidad utilizando una técnica de combinación de ganancia igual, la recepción obtenida es en gran medida inmune al desvanecimiento. No obstante, es difícil obtener la separación suficiente entre las antenas del sistema de recepción y transmisión en la banda de ondas decamétricas. En dicho caso, la diversidad de polarización, más que la diversidad espacial, puede ayudar a minimizar las configuraciones de antena y las estructuras correspondientes.

3 Ensayos de la BLU RZ en condiciones reales

Hay una gran diferencia entre las características de propagación en la banda de ondas decamétricas y en la de ondas métricas. Como la BLU RZ supone una innovación notable respecto a la tecnología BLU convencional en ondas métricas, es evidente que la BLU RZ puede ser útil para superar los inconvenientes básicos y tradicionales de las comunicaciones en ondas decamétricas. Por este motivo, se han efectuado ensayos en el terreno empleando cuatro frecuencias en las bandas de 3, 5, 8 y 11 MHz, con el fin de investigar la adaptabilidad de la técnica BLU RZ a las bandas de ondas decamétricas. En un ensayo real en la banda de ondas decamétricas se examinará si la BLU RZ es eficaz para mejorar la calidad de transmisión en entornos de desvanecimiento y si dicha técnica puede servir para las comunicaciones de datos en las actuales condiciones técnicas y reglamentarias.

Las características de transmisión de la BLU RZ se han examinado ampliamente en ensayos realizados en laboratorio y en condiciones reales para las bandas de ondas métricas. Los experimentos en laboratorio tenían como fin evaluar las características de la BLU RZ utilizando simuladores móviles de propagación radioeléctrica que pueden reproducir de forma precisa los entornos de desvanecimiento que se presentan en los canales radioeléctricos móviles, así como los entornos de ruido térmico. Este sistema permite efectuar ensayos de transmisión y de recepción utilizando una amplia gama de señales de información tales como tonos fijos, señales vocales, música, señales de módem a diversas velocidades binarias, facsímil G3, imágenes estáticas, etc.

En 1992 se efectuaron ensayos en condiciones reales de la BLU RZ en la zona metropolitana de Tokio, en la banda de 150 MHz. También en 1995 se efectuaron demostraciones en condiciones reales en Washington D.C. y en Denver, Colorado, en canales de la banda de 220 MHz [Daikoku y Yamada, 1995]. Durante las demostraciones se logró una transmisión excelente de imágenes fotográficas en entornos de desvanecimiento utilizando un facsímil G3 de 9,6 kbit/s.

La resistencia de la técnica BLU RZ en entornos de desvanecimiento intenso para las bandas de ondas métricas que se demostró en pruebas de laboratorio y en condiciones reales, permite su utilización en una amplia gama de aplicaciones. La BLU RZ es la única técnica BLU capaz para la transmisión y recepción de imágenes de gran calidad, así como de señales musicales de sonido de gran calidad sin degradaciones debidas a variaciones de la portadora, incluso en entornos de desvanecimiento intenso.

4 Análisis y conclusión

4.1 Lincompex o BLU RZ

La dependencia de la onda ionosférica en las comunicaciones de larga distancia tiene una serie de inconvenientes tales como el de los desvanecimientos profundos, los desvanecimientos de larga duración y la distorsión del retardo debida a la propagación multitrayecto, la variación de la altitud de la capa ionosférica, el movimiento entre el transmisor y el receptor, etc. A fin de resolver el problema de estos desvanecimientos en la banda de ondas decamétricas se desarrolló el sistema Lincompex que fue adoptado como norma del UIT-R (Recomendación UIT-R F.455 (1998) – Sistema perfeccionado de transmisión para circuitos radiotelefónicos en ondas decamétricas). El principio básico de la técnica de procesamiento de la señal utilizado en el sistema Lincompex es el de la compresión de las señales vocales de entrada, logrando una amplitud constante para la transmisión. En la recepción, las señales se expanden de nuevo hasta los niveles originales mediante la actuación de una señal de control transmitida por separado. Actualmente existen modernos sistemas Lincompex basados en las tecnologías recientes de procesamiento de la señal digital que se integran en los enlaces radioeléctricos en ondas decamétricas.

Como el sistema Lincompex se orientaba inherentemente a la mejora de la calidad de las señales vocales en la transmisión para los servicios telefónicos de radiomóviles marítimos en ondas hectométricas y decamétricas, es normal que el sistema Lincompex no sirva para las señales de módem. El sistema continúa sufriendo las degradaciones causadas por factores tales como los de desintonía de la portadora, deriva Doppler, retardo de grupo, etc. A diferencia del Lincompex, el sistema BLU RZ puede superar dichas degradaciones hasta un cierto nivel deseado, lo cual se comprobó a través de la calidad de transmisión en las bandas de ondas métricas lograda en ensayos en laboratorio y en condiciones reales. La aparición de la técnica BLU RZ ha supuesto un gran avance respecto a la tecnología BLU convencional desde su invención.

4.2 Aplicación de la tecnología BLU RZ

Con la tecnología BLU RZ se ha logrado superar los desvanecimientos intensos presentes en los entornos móviles y obtener una gran calidad de transmisión. Ampliando la anchura de banda de la información disponible hasta 3,4 kHz, que es idéntica a las de las líneas telefónicas convencionales, la técnica BLU RZ sirve para una amplia gama de señales vocales, música, datos y facsímil y permite establecer comunicaciones móviles de gran calidad a través de una interfaz continua con la red telefónica.

El sistema BLU RZ en el que la información transmitida se extrae de los pasos por cero de la señal recibida aporta dos ventajas principales. En primer lugar, este método de demodulación queda totalmente libre de degradaciones debidas a la desintonía de la portadora que constituyen uno de los inconvenientes principales de la BLU convencional. En segundo lugar, la gran resistencia del sistema BLU RZ a los desvanecimientos puede obtenerse incluso para la recepción por canal único introduciendo un compensador de ruido aleatorio MF en el receptor. Hay que añadir que la recepción con diversidad espacial por dos canales con combinación de ganancia igual resulta muy eficaz, mejorando drásticamente la calidad de transmisión de las distintas señales de información. Sin la introducción de estas dos tecnologías innovadoras en el sistema BLU RZ, no sería posible lograr una gran calidad de transmisión en una amplia gama de señales de información.

4.3 Eficacia espectral

4.3.1 Utilización del espectro de frecuencias

Como medio de comunicaciones a nivel mundial, las ondas decamétricas están sujetas al Reglamento de Radiocomunicaciones que ha desarrollado la UIT. Hasta el momento, se ha realizado una gran labor para mejorar la calidad de los enlaces radioeléctricos en ondas decamétricas, utilizando innovaciones del soporte lógico y del soporte físico.

La introducción de una aplicación lineal en un bucle de realimentación cartesiano para las comunicaciones en ondas decamétricas puede suponer una innovación en la actual eficacia de utilización del espectro. Un amplificador de potencia con bucle de realimentación cartesiano permite suprimir en la mayor medida posible la radiación fuera de banda en el canal adyacente y los niveles de señales espurias, lo que se traduce en un espectro de modulación compacto. Ello significa que es innecesario utilizar una anchura de banda que contenga emisiones fuera del canal, con lo que es posible atribuir frecuencias portadoras más cercanas entre sí.

4.3.2 Comunicaciones de datos

Cuando se efectuaban comunicaciones de datos en la banda de ondas decamétricas utilizando el sistema BLU convencional que carecía de la calidad suficiente para lograr un gran caudal, se estudiaron arduamente otros métodos como forma eficaz de mejorar la calidad de los módems que

funcionan en entornos con desvanecimientos. A lo largo de los años se han desarrollado diversas formas de onda de módems a fin de satisfacer las condiciones del canal de ondas decamétricas, tales como las de módem FSK, las de módem de tono paralelo, las de módem de tono único, etc. Estos equipos módem pueden aplicarse satisfactoriamente a la técnica BLU RZ y de esta manera, cuando se aplica la BLU RZ a las comunicaciones de datos en ondas decamétricas, la misma resistencia que se obtuvo al introducir las dos tecnologías innovadoras en la BLU RZ puede también permitir aumentar el caudal de una transmisión de datos en ondas decamétricas.

Referencias Bibliográficas

- JOHNSON, E. E. y otros [1997] *Advanced high-frequency radio communications*. Artech House, Boston, Estados Unidos de América.
- MASLIN, N. [1987] *HF communications: A system approach*. Plenum Press New York, Estados Unidos de América.
- DAIKOKU, K. y SUWA, K. [noviembre de 1988] RZ SSB transceiver with equal-gain combiner for speech and data transmission. *IEEE Globecom '88*, p. 26, § 4.1-§ 4.5.
- SABIN, W. E. y SCHOENIKE, E. O. [1987] *Single-sideband systems and circuits*. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, Estados Unidos de América.
- NAGATA, Y. [mayo de 1989] Linear amplification technique for digital mobile communications. *Proc. 39th IEEE Veh. Tech. Conf.*, p. 159-164.
- HAHN, S. L. [1996] *Hilbert transforms in signal processing*. Artech House, Boston, Estados Unidos de América.
- LOGAN, B. F. [abril de 1977] Information in the zero crossings of bandpass signals. *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 56, 4, p. 487-510.
- DAIKOKU, K. y YAMADA, K. [agosto de 1995] RZ SSB Very narrow-band technology for the information age, *Radio Resources Magazine*, p. 42-46.
-