

DISEÑO DE AMPLIFICADORES DIFERENCIALES DE BAJO RUIDO PARA ANTENAS UWB EN LA BANDA BAJA DEL PROYECTO SKA

Óscar A. García Pérez⁽¹⁾⁽²⁾, Vicente González Posadas⁽³⁾, José L. Jiménez Martín⁽³⁾, José M. Serna Puente⁽²⁾, Enrique García Muñoz⁽¹⁾, Daniel Segovia Vargas⁽¹⁾, José A. López Fernández⁽²⁾.
ogarpe@tsc.uc3m.es, vgonzalz@diac.upm.es, jljimene@diac.upm.es, jm.serna@oan.es, legarcia@tsc.uc3m.es,
dani@tsc.uc3m.es, ja.lopez@oan.es.

⁽¹⁾ Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicación, Universidad Carlos III de Madrid.

Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés Madrid (España).

⁽²⁾ Centro Astronómico de Yebes, Observatorio Astronómico Nacional.

Cerro de la Palera s/n, 19141 Yebes Guadalajara (España).

⁽³⁾ Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid.
Ctra. Valencia km. 7, 28031 Madrid (España).

Abstract- Differential amplifiers can be an appropriate solution in the implementation of radio astronomy receivers, due to their efficient interference and harmonic isolation. In this paper, two different topologies are presented. The first one consists of two single ended amplifiers in a balanced topology. The second one is formed by cascading two simple differential stages. Both circuits operate in the 300MHz to 1GHz bandwidth. Firstly, gain and noise characterizations of each amplifier have been done. Lastly, noise analysis of the whole reception system, formed by the antenna and the differential amplifiers, is presented.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto SKA (*Square Kilometer Array*) es un esfuerzo de la comunidad internacional para investigar y desarrollar las tecnologías necesarias para construir un nuevo radiotelescopio en una extensión de un kilómetro cuadrado de área [1]. Este instrumento va a ser mucho más sensible que los radiotelescopios actuales, y va a funcionar en un ancho de banda comprendido entre los 100MHz y los 25GHz.

Actualmente se están realizando gran cantidad de trabajos de investigación en este ámbito en todo el mundo. Una de estas tareas es el diseño de amplificadores de bajo ruido que funcionen en la banda de frecuencia entre 100MHz y 1GHz. El principal problema con los sistemas de radioastronomía que funcionan a esas frecuencias es el alto nivel de ruido atmosférico que reciben las antenas de banda ancha y no muy directivas.

El uso de antenas diferenciales (Vivaldy, Bunny Ear) para cubrir la banda baja del proyecto SKA hace que se planteen dos posibilidades en el diseño de los amplificadores de bajo ruido del receptor. Una primera aproximación puede consistir en conectar un balun a los puertos de la antena, y a continuación utilizar un amplificador de bajo ruido convencional *single-ended*. La otra solución no requiere el uso de baluns pasivos, que van a introducir pérdidas, sino que utiliza amplificadores diferenciales a modo de balun activo. El uso de dispositivos electrónicos diferenciales es bastante común en sistemas de baja frecuencia, pero su uso

para frecuencias de microondas no está tan extendido. Sin embargo, para el caso de amplificadores de microondas de bajo ruido, el uso de una topología diferencial reduciría sustancialmente la cantidad de ruido acoplado en modo común (por ejemplo el introducido por las alimentaciones del amplificador). Por otro lado, hay problemas inherentes añadidos al trabajar con parámetros S diferenciales en vez de con los tradicionales.

En esta línea se han propuesto algunas soluciones, sobre todo basadas en tecnología MMIC [2] [3]. En este trabajo se presentan dos diseños alternativos basados en elementos concentrados y realizados en tecnología microstrip.

II. AMPLIFICADORES DIFERENCIALES DE MICROONDAS

Las aplicaciones de baja frecuencia han venido utilizando circuitos balanceados durante años para reducir las interferencias y eliminar las líneas de referencia a masa. Hay muchas ventajas en el uso de circuitos diferenciales en vez de los dispositivos *single-ended*. Estas propiedades no han pasado desapercibidas a los investigadores y diseñadores de circuitos, lo que ha provocado un gran incremento en su uso para aplicaciones de alta frecuencia y de microondas. Las principales ventajas que introducen son:

- Aislamiento frente a interferencias externas.
- Aumento del rango dinámico.
- Reducción de la distorsión de los armónicos pares.

Por otro lado, hay algunas desventajas inherentes en el uso de estos circuitos diferenciales en sistemas de microondas, y que hay que tener en cuenta en nuestro diseño:

- Se duplica el número de componentes.
- Se aumenta el tamaño necesario.
- Mayor consumo de potencia.
- Son más difíciles de diseñar y de caracterizar.

Mediante el uso de los parámetros S en modo mixto [4], los cuales permiten extender los parámetros S convencionales de dos puertos a un dispositivo diferencial de cuatro puertos, la última desventaja puede ser mitigada en gran medida. Además, el desarrollo de los analizadores de redes vectoriales en modo puro (PMVNA – *Pure Mode Vector Network Analyzer*) [5], [6], que permiten medir directamente estos parámetros S en modo mixto, pueden ser un punto clave que facilite el diseño y caracterización de este tipo de dispositivos. Por lo tanto, los circuitos diferenciales pueden convertirse en una solución práctica en muchos sistemas de microondas.

Dos topologías típicas de amplificadores diferenciales son las que se muestran en la Fig. 1. La primera consiste en dos etapas amplificadoras *single-ended* independientes e idénticas, con entrada y salida tomadas de forma diferencial (topología balanceada). La segunda usa dos transistores con fuente de corriente común (topología diferencial clásica). La principal diferencia entre ambas es que la segunda introduce un parámetro de calidad que se conoce como rechazo en modo común (CMRR – *Common Mode Rejection Ratio*), que relaciona la ganancia en modo diferencial S_{dd21} y la ganancia en modo común S_{cc21} como

$$CMRR = \frac{S_{dd21}}{S_{cc21}}. \quad (1)$$

La topología balanceada no presenta esta propiedad, ya que amplifica las señales que se introducen en modo común por los puertos de entrada y que se recuperan también en modo común en los puertos de salida. Por el contrario, el esquema diferencial anula este tipo de señales perfectamente en un caso ideal. De todos modos, el esquema balanceado podría presentar este rechazo sin más que añadir una etapa diferencial a su salida. Esta etapa puede tener un esquema simple, y no es necesario que sea de bajo ruido debido a que su influencia en la figura de ruido del sistema se ve atenuada por la ganancia de la primera etapa balanceada. Los dos tipos de esquemas descritos han sido diseñados y se van a presentar en las siguientes secciones.

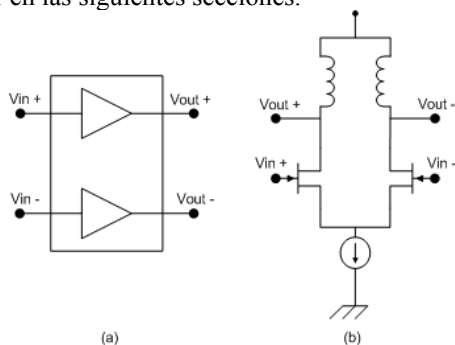


Fig. 1. Dos topologías típicas de amplificador diferencial: balanceado (a) y diferencial clásico (b).

III. DISEÑO DE LOS AMPLIFICADORES DIFERENCIALES DE BAJO RUIDO

A. Esquema diferencial

El esquema del amplificador diferencial con fuente de corriente común se muestra en la Fig. 2. Se ha realizado en tecnología microstrip, con sustrato de permitividad $\epsilon_r=2.7$ y espesor $H=1mm$. El circuito se ha construido colocando en cascada dos etapas diferenciales simples. Entre ambas etapas diferenciales se ha colocado una red RLC de adaptación. El

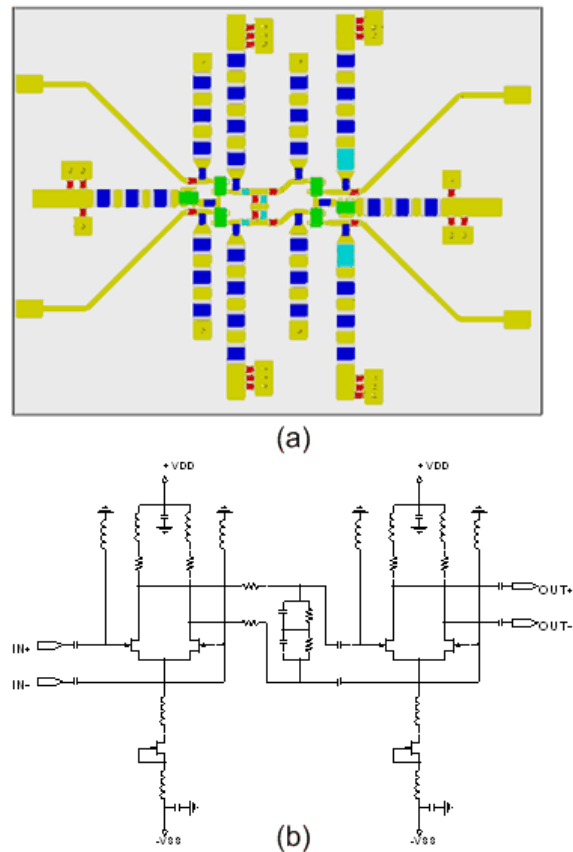


Fig. 2. Amplificador diferencial: vista superior de la placa del circuito (a) y esquemático (b). Las dimensiones de la placa son de 62.4mmx48.1mm.

diseño de esta red supone un compromiso entre conseguir una buena adaptación y disminuir la figura de ruido en toda la banda. Las bobinas de choque se han formado colocando varias bobinas de valores distintos en serie para garantizar un aislamiento correcto de la red de polarización respecto a la red de señal en todo el ancho de banda de funcionamiento. Del mismo modo, se han colocado varios condensadores en paralelo en la red de polarización para evitar que picos transitorios de voltaje que se produzcan en esta red se acoplen en las etapas de señal. Los transistores utilizados son FETs de bajo ruido del modelo ATF-34143 de Agilent.

B. Esquema balanceado

El diseño del amplificador balanceado de bajo ruido (placa de circuito impreso y esquemático circuital) se presenta en la Fig. 3. Ha sido diseñado también en tecnología microstrip, con sustrato de permitividad $\epsilon_r=3.4$ y espesor $H=1mm$, y está formado por dos amplificadores independientes e idénticos. Cada amplificador consta de tres etapas en fuente común situadas en cascada. La adaptación entre etapas se realiza mediante una resistencia en serie, entre el drenador de una etapa y la puerta de la siguiente. La alimentación de cada etapa se realiza mediante un transistor bipolar autopolarizado. Igual que en el caso anterior, se han añadido varias bobinas de choque en serie, para aislar la red de alimentación, y varios condensadores en paralelo a tierra, para eliminar picos de voltaje en las etapas de amplificación. Los transistores utilizados en los amplificadores son FETs de bajo ruido, modelo ATF-34143 de Agilent.

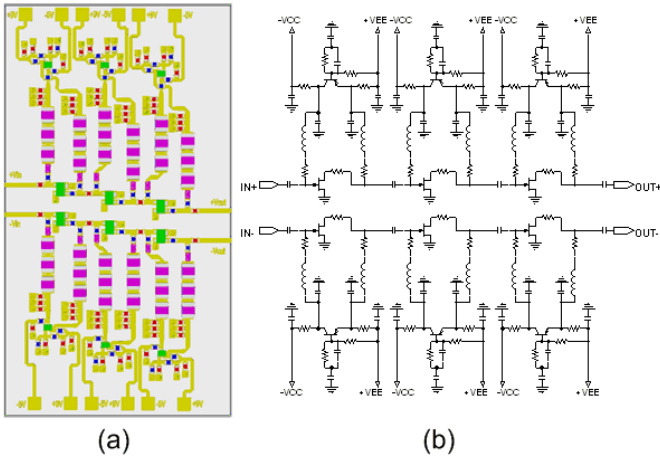


Fig. 3. Amplificador balanceado: vista superior de la placa del circuito (a) y esquemático (b). Las dimensiones de la placa son de 35.6mmx68.4mm.

C. Resultados simulados

Los resultados simulados de los dos amplificadores descritos anteriormente se muestran en Fig. 4 y Fig. 5 respectivamente. El software utilizado para la simulación ha sido el *AWR Microwave Office*. Dichas simulaciones se han obtenido colocando baluns ideales en los puertos de entrada y de salida de los circuitos, transformando el dispositivo de cuatro puertos en uno de dos. En la banda de trabajo, de 300MHz a 1GHz, se obtienen ganancias superiores a 28dB con el primer diseño y a 45dB con el segundo. Por su parte, la figura de ruido es inferior a 1.6dB y a 1.4dB para cada diseño respectivamente. Hay que tener en cuenta que las

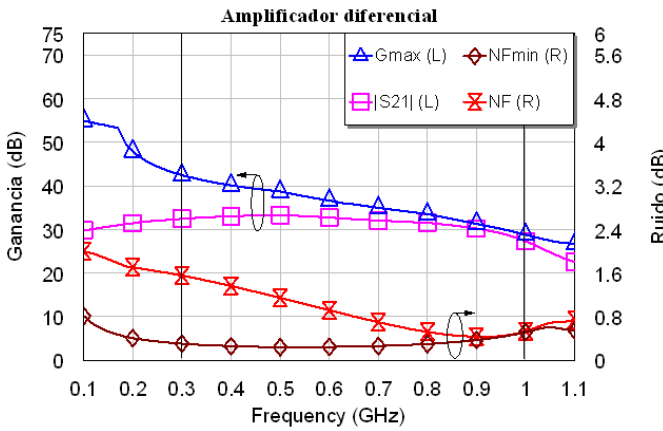


Fig. 4. Simulación del amplificador diferencial con impedancia de referencia de 50 Ω: ganancia máxima (G_{max}), ganancia ($|S_{21}|$), figura de ruido mínima (NF_{min}) y figura de ruido (NF).

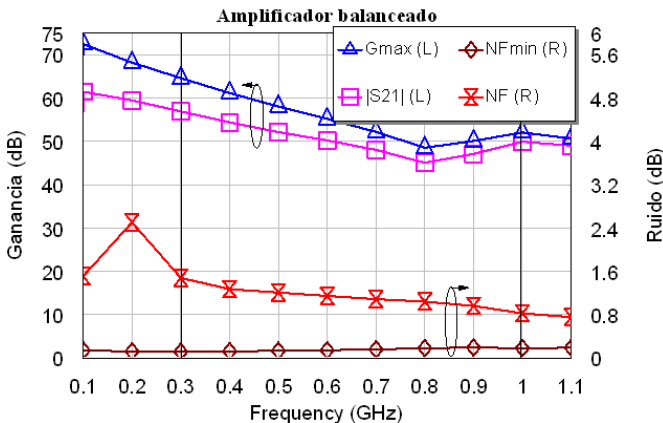


Fig. 5. Simulación del amplificador balanceado con impedancia de referencia de 50 Ω: ganancia máxima (G_{max}), ganancia ($|S_{21}|$), figura de ruido mínima (NF_{min}) y figura de ruido (NF).

anteriores características se han obtenido suponiendo una impedancia de entrada de 50Ω. Si se modifica la impedancia de entrada a 150Ω, que es la esperada para la antena que se va a utilizar, estos valores de ganancia y ruido variarían. En concreto, modificando la impedancia a 150Ω, obtendríamos ganancias superiores a 28dB y 45dB en cada caso, y figuras de ruido inferiores a 0.7dB y 0.65dB respectivamente.

IV. CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DEL RECEPTOR

Una vez se han presentado las características de ganancia y de ruido de los amplificadores por separado, el siguiente paso es caracterizar el sistema completo, integrando la antena junto al amplificador. El elemento radiante es una antena de tipo *bunny-ear*. Este tipo de antenas tienen dos puertos en salida diferencial, que se conectarán a las entradas del amplificador diferencial de bajo ruido. La caracterización de esta antena se ha realizado teniendo en cuenta el acoplo mutuo con otros elementos al colocarlos en un array. Por lo tanto, se han obtenido diferentes impedancias de la antena en función del ángulo de escaneo del array. Para realizar las simulaciones, se ha transformado la impedancia de la antena a un puerto utilizando un balun ideal (Fig. 6 (a)), ya que es imprescindible tener un dispositivo con un puerto de entrada y un puerto de salida para caracterizar la figura de ruido del sistema. A continuación se ha introducido esta impedancia en el puerto de entrada del esquema de la Fig. 6 (b), que simula el receptor completo. Además se han introducido dos resistencias de *padding* de 3kΩ en los puertos de la antena, que se han tenido en cuenta en la simulación.

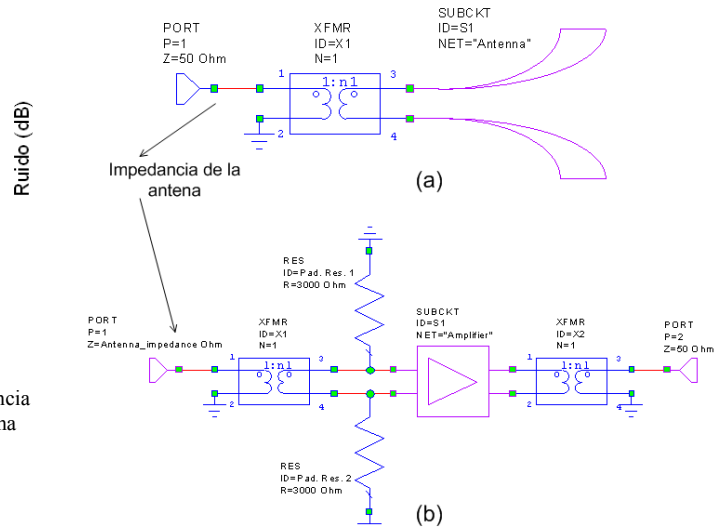


Fig. 6. Circuito para obtener la impedancia de la antena (a), y circuito de caracterización del receptor (b).

La caracterización de ruido se ha realizado usando la temperatura equivalente de ruido T_e . Este parámetro se puede calcular como

$$T_e = T_0 \cdot (NF - 1), \quad (2)$$

donde T_0 es la temperatura standard en Kelvin (290K), y NF es el factor de ruido. Esta medida usa los valores de la impedancia de la fuente para calcular el factor de ruido.

Las gráficas de la temperatura de ruido del sistema usando el amplificador balanceado y el amplificador diferencial, para diferentes ángulos de escaneo del array de

antenas (0rad, 0.4rad y 0.8rad), se presentan en la Fig. 7 y en la Fig. 8 respectivamente. Se han obtenido valores de temperatura equivalente de ruido entorno a 60K (NF=0.8dB) con ambos tipos de amplificadores. Para ángulo de escaneo de 0° (*broadside*), la temperatura de ruido no supera los 90K (NF=1.2dB) para el esquema diferencial y los 67K (NF=0.9dB) para el esquema balanceado.

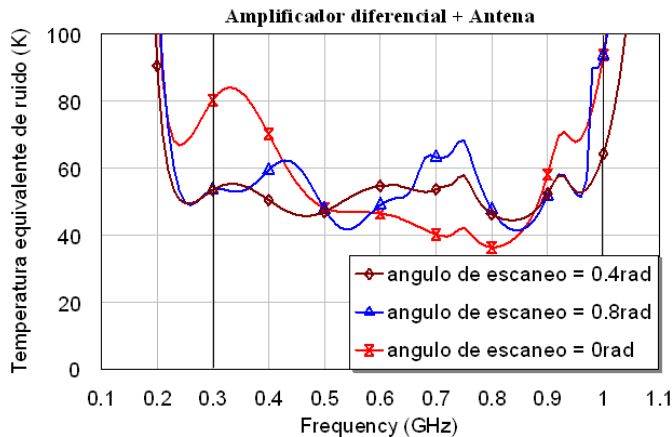


Fig. 7. Simulación de la temperatura equivalente de ruido del receptor utilizando el amplificador diferencial.

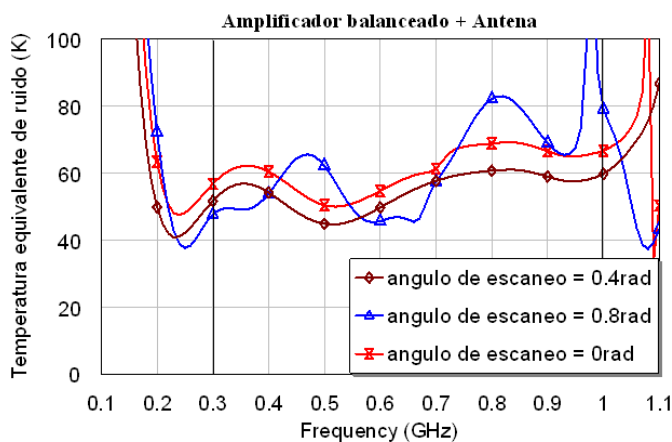


Fig. 8. Simulación de la temperatura equivalente de ruido del receptor utilizando el amplificador balanceado.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado los amplificadores diferenciales de microondas como una opción eficiente para el desarrollo de sistemas receptores de bajo ruido. Además añaden ventajas intrínsecas a la topología, como el rechazo de señales interferentes. Estas propiedades son especialmente críticas en sistemas de radioastronomía, que es la aplicación para la que se han desarrollado los dispositivos presentados. Concretamente se han descrito y diseñado dos modelos diferentes, uno basado en un esquema balanceado y el otro basado en un esquema diferencial. Se ha demostrado que es posible obtener altos valores de ganancia y bajos niveles de ruido para anchos de banda de funcionamiento grandes (en este caso el diseño funcionaba entre 300MHz y 1GHz). La rigurosidad con la que se han realizado las simulaciones nos hace ser optimistas de cara a poder replicar los resultados simulados con la implementación real de los circuitos que está en proceso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación General de la Universidad de Alcalá – Instituto Geográfico Nacional (FG-IGN) para el proyecto europeo SKADS (*Square Kilometer Array Design Studies*).

REFERENCIAS

- [1] Web del SKA Telescope:
URL: <http://www.skatelescope.org>
- [2] J. Lintignat, S. Darfeuille, B. Barelaud, L. Billonnet, B. Jarry, P. Mcunier and P. Gamand, "A 0.1-1.7 GHz, 1.1 dB NF low noise amplifier for radioastronomy application", *Microwave Integrated Circuit Conference*, pp. 231-234, Oct. 2007.
- [3] J. Morawietz, R. H. Witvers, J. G. B. de Vaate, and E. E. M. Woestenburg, "Noise characterization of ultra low noise differential amplifiers for next generation radiotelescopes" *European Microwave Conference*, pp. 1570-1573, Oct. 2007.
- [4] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Combined differential and common-mode scattering parameters: theory and simulation," *IEEE Trans. on Microw. Theo. and Tech.*, vol. 43, no. 7, pp. 1530-1539, Jul. 1995.
- [5] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Pure-mode network analyzer for on-wafer measurements of mixed-mode S-parameters of differential circuits," *IEEE Trans. on Microw. Theo. and Tech.*, vol. 45, no. 7, pp. 1071-1077, Jul. 1997.
- [6] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Calibration and verification of the pure-mode vector network analyzer," *IEEE Trans. on Microw. Theo. and Tech.*, vol. 46, no. 7, pp. 1009-1012, Jul. 1998.