

TITULO Y PLAN DE TRABAJO A REALIZAR

Aspectos de diseño de sistemas de múltiples antenas y desarrollo de técnicas de compensación/reducción de imperfecciones asociadas al front-end de radio frecuencia.

Objetivos Generales

El problema general en estudio está asociado a nuevas y mejores prestaciones de los servicios previstos en comunicaciones inalámbricas utilizando sistemas con múltiples antenas los cuales proveen una mayor tasa de transmisión y gran robustez. Entre las aplicaciones básicas posibles se pueden mencionar: comunicaciones móviles de cuarta generación, sistemas WiMAX, LTE advanced. También es posible extender su operación en el contexto de sistemas de radio cognitiva y sistemas cooperativos, los cuales, en la actualidad, están siendo ampliamente estudiados tanto a nivel de investigación académica como en la industria.

Desde la perspectiva de Procesamiento de señales, se colocará especial atención en comunicaciones digitales de última generación, con particular énfasis en comunicaciones inalámbricas, particularmente en aspectos relacionados con el diseño de técnicas de compensación/reducción de las imperfecciones generadas en el front-end analógico [1-3]. Por otra parte, se prevé que durante el trabajo de tesis el postulante incorpore conocimientos asociados al diseño de circuitos en radio frecuencia lo cual permitirá avanzar hacia el co-diseño de los algoritmos de compensación digital y la construcción del front-end de RF.

Fundamentos

El objetivo del Plan de Trabajo es contribuir al desarrollo de sistemas de comunicaciones de elevada prestación basados en estructuras multi-antena. Basándose en resultados previos, es interesante resaltar que las ventajas de las tecnologías MIMO no son completamente explotadas en la actualidad. En este plan de trabajo se prevé el desarrollo de técnicas que utilizan múltiples antenas, tales como: steered beam array, phased array, beamtilt, amplifier/antena integrated multibeam array, diseñadas y optimizadas para operar en un escenario "real" donde aparecen las imperfecciones del front-end analógico y efectos de acoplamiento entre antenas.

Dos campos de aplicación específicos que dan una idea objetiva del impacto de las contribuciones posibles de la presente línea de trabajo, paralelamente a la formación de recursos humanos en un área tecnológica de vacancia, son las comunicaciones móviles de cuarta generación y las redes de sensores que pueden formar parte de sistemas de comunicaciones cooperativos.

La evolución de los sistemas de comunicaciones hacia estructuras multi-estándar, donde es clave la adaptación de del front-end analógico para operar a diferentes frecuencias de operación y con diferentes niveles de señal, requieren sistemas flexibles y reconfigurables manteniendo un reducido tamaño y un costo accesible. En el escenario multi-antena – multi-radio, la premisa de reducido costo y tamaño es muy difícil de lograr utilizando los componentes comerciales actuales [20-21]. Esta dificultad tecnológica resulta en varias imperfecciones en los transceivers asociadas particularmente a la electrónica analógica de radio frecuencia (RF). Ruido de fase proveniente del oscilador local, imperfecciones de los moduladores, distorsión no-lineal introducida por la etapa amplificadora y el mezclador, desplazamiento de la frecuencia de portadora, ruido de cuantización proveniente de los conversores digital a analógico (DAC) y analógico a digital (ADC), desbalance en el modulador, errores de muestreo y acoplamiento entre los diferentes caminos del sistema MIMO son factores que limitan severamente el desempeño del sistema y deben ser corregidos.

Objetivos específicos

La aplicación de sistemas MIMO está contemplada en la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones inalámbricas [4-5], incluyendo sistemas cooperativos y redes de sensores [6-8]. En ese contexto es posible definir los siguientes objetivos específicos de investigación:

- **Modelado de las imperfecciones del front-end analógico, particularmente de sistemas MIMO de banda ancha.**

Estos estudios se realizarán en base a ambientes de simulación realistas que contemplen diversas características de las aplicaciones básicas involucradas, existiendo la alternativa de verificación de algunos de los esquemas propuestos a través de prototipos específicos.

Modelos asociados al crosstalk entre las diferentes ramas del sistema MIMO (anterior y posterior a la etapa amplificadora), acoplamiento entre osciladores locales de la etapa moduladora/demoduladora, intermodulación debido a la no linealidad de cables, acopladores y antenas y, acoplamiento electromagnético entre antenas [9] son problemáticas específicas de los sistemas MIMO y deberán ser validados a través de

mediciones. Esto es debido, a que en la actualidad, no existe bibliografía específica en estos temas, y por lo tanto no existen modelos realistas.

- **Desarrollo de métodos de compensación de las imperfecciones de RF inherentes a sistemas MIMO.**

En sistemas MIMO, existen múltiples alternativas para atenuar/minimizar los efectos nocivos de los componentes noideales del front-end. Por un lado, las técnicas aplicadas en sistemas SISO para la compensación de las diferentes imperfecciones: desbalance IQ [10], ruido de fase [11], jitter, respuesta no lineal de amplificadores [12] y efectos de cuantización de conversores AD y DA, pueden ser extendidas a sistemas de múltiples antenas [13-14].

Además existen técnicas específicas que explotan la diversidad asociada a los sistemas MIMO y pueden ser de gran utilidad para minimizar los efectos de estas distorsiones [15-19]. Particularmente, basados en los siguientes esquemas de transmisión que comprenden el estado del arte: a) Beamforming, b) steered beam array, c) phased array y otras variantes, donde la incidencia de las distorsiones y los niveles de interferencia pueden ser minimizados con un adecuado diseño.

- **Codiseño de front-end analógico y técnicas de compensación/remoción/reducción en DSP.**

Existe un "gap" entre los diseñadores de RF, y el grupo dedicado a la creación de algoritmos. Algoritmos que funcionan en forma adecuada en ambientes de simulación y prototipos, presentan un "pobre" desempeño al ser implementados en sistemas "reales" debido a que en el diseño del algoritmo no fueron contemplados diversos factores que afectan al sistema "real". Por otro lado, muchas veces los algoritmos requieren una elevada complejidad de implementación, lo cual hacen su implementación irrealizable en la práctica.

La tendencia actual en la implementación de transceivers es el co-diseño de los circuitos analógicos y las técnicas de compensación en el dominio digital.

Esto permitiría optimizar el desarrollo de las técnicas de compensación en problemáticas específicas. Por otro lado, esto obliga a la formación de recursos humanos con conocimiento integral de diseño de RF y procesamiento digital de señales (PDS).

Metodologías

En función de los objetivos específicos, cabe fundamentar la base de las metodologías a ser utilizadas para alcanzarlos. Las metodologías a utilizar siguen las siguientes líneas principales:

Modelado de las imperfecciones del front-end analógico.

Debido a limitaciones de costo y tamaño el front-end analógico de los sistemas de comunicaciones de uso masivo (telefonía celular, WiMAX, WiFi, etc...) presenta imperfecciones, que si no son corregidas, pueden afectar seriamente el desempeño del sistema.

El primer paso para el desarrollo de compensadores/predistorsionadores/ecualizadores es tener disponible un modelo que describa el comportamiento de estas imperfecciones. Respuesta no lineal en los amplificadores, antenas, ruido de fase y jitter provenientes de osciladores locales, desbalances en los moduladores/demoduladores son imperfecciones que han sido muy estudiadas y existe una gran variedad de modelos que describen adecuadamente su comportamiento.

Por otro lado, el acoplamiento electromagnético entre las capas del circuito impreso, trazas, cables y otros componentes ubicados cercanos unos a otros y sujetos a campos electromagnéticos, es un fenómeno que aparece en el caso de múltiples front-ends (múltiples antenas) y aún no ha sido ampliamente estudiado.

Desarrollo de técnicas de compensación de las imperfecciones de RF específicas de un escenario MIMO

Existen diversas técnicas de implementación MIMO, mayormente la complejidad de implementación se encuentra en la estación base que es la encargada de concentrar todos los canales móviles en un solo hardware. En la práctica la diversidad espacial y la administración de coberturas se logra mediante diferentes técnicas de el arreglo multiantena en la estación base. En la actualidad las técnicas más utilizadas se resumen a continuación: [22] beamforming, steered beam array, phased array, beamtilt, amplifier/antenna integrated multibeam array entre los principales. Como es de esperar cada una presenta ventajas y desventajas a la hora de transmitir sin imperfecciones o recuperar los datos recibidos con la menor tasa de error posible.

De las técnicas mencionadas, amplifier/antenna integrated multibeam array es una de las más prometedoras dado que utiliza amplificadores distribuidos por cada antena lo cual genera una ganancia en eficiencia de radiación y disminuye los problemas de intermodulación en los cables y acopladores de RF debido a que trabaja con potencias más pequeñas. Estas mejoras se ven afectadas por la necesidad de utilizar circuitos híbridos en cuadratura, arreglos de matrices de Butler y otros accesorios lo que generan problemas de fase y dispersión en frecuencia, afectando la ortogonalidad espacial entre los lóbulos de las antenas. En este sentido,

la problemática presenta una gran oportunidad para el co-diseño DSP-RF y la compensación DSP de las imperfecciones en las señales intervinientes [22], [23] [24].

En el escenario citado y con los antecedentes mencionados el Plan de Trabajo se desarrollará con la siguiente metodología:

- [1] Se estudiarán los diferentes modelos matemáticos de imperfecciones disponibles en la literatura para modelar los siguientes efectos: a) respuesta no lineal, b) desbalance I/Q y c) ruido de fase. Dichos modelos se validarán con herramientas de simulación apropiadas realizando los diseños pertinentes basados en librerías de componentes y dispositivos provistos por fabricantes.
- [2] Se implementarán los diseños anteriores y utilizando el equipamiento disponible se medirán los efectos de acoplamiento entre ramas del sistema MIMO.
- [3] Se ajustará un modelo matemático que permita representar con precisión los efectos de acoplamiento.

Hitos de Evaluación

El Plan de Trabajo se desarrollará en base a las siguientes etapas cronológicas, cada una de aproximadamente 6 meses:

- 1) Estudio del estado del arte de las técnicas de arreglos de antena y las relaciones de compromiso del conjunto con énfasis en la problemática de compensación MIMO. Análisis de las técnicas más apropiadas y sus características.
- 2) Implementación en software de simulación electromagnética del arreglo de antenas.
- 3) Co - simulación del arreglo junto con los amplificadores y las señales procesadas digitalmente.
- 4) Estudio y modelado de las imperfecciones (ruido, distorsión memoria) en diferentes sectores del conjunto.
- 5) Diseño y evaluación de técnicas de compensación para las imperfecciones estudiadas.
- 6) Estudio y evaluación del diseño de técnicas de compensación en el ámbito de radio frecuencia.

Lugar de trabajo

El Laboratorio de Procesamiento de señales y comunicaciones, en el cual se desarrollará el doctorado, forma parte del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica (IIIE) "Alfredo Desages". Este Instituto desarrolla sus actividades dentro del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras (DIEC) de la Universidad Nacional del Sur, y fue creado por resolución 17/97 de la Asamblea Universitaria de la Universidad Nacional del Sur.

Este instituto está compuesto por los grupos de Sistemas Digitales, Sistemas de Programación, Comunicaciones, Dinámica de Sistemas y Control. El potencial de trabajo coordinado de estos grupos posibilita el desarrollo de actividades científico-tecnológicas en áreas de fundamental importancia para el desarrollo del país.

Disponibilidad de Fondos

Las actividades desarrolladas en el marco de la beca solicitada se encuadran en una serie de iniciativas en la temática, asociadas al Laboratorio de Procesamiento de Señales y Comunicaciones, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur. La participación del becario estará relacionada con los proyectos de investigación aplicada que allí se desarrollan. En particular

- **PICT-2008-0182**, "Técnicas avanzadas de procesamiento de señal para reducción de imperfecciones de RF en sistemas de comunicaciones de última generación". Director: Dr. Juan Cousseau. Vigencia: 2009-2011 (3 años)
- **PICT-2008-00104**, "Aplicación de técnicas de procesamiento digital en sistemas de comunicaciones de banda ancha de elevada portabilidad". (PICT Joven). Director Dr. Fernando Gregorio. Vigencia: 2010-2011 (2 años)
- **PGI 2009**, "Modelado y compensación de imperfecciones de RF en sistemas de comunicaciones de última generación", Código del proyecto: 24/K044. Acreditado en el Programa de Incentivos. Director: Des. Juan Cousseau / Fernando Gregorio. Vigencia: 2009-2011 (3 años)
- **PIP 112-200801-01024**, "Técnicas de Procesamiento de Señales Avanzadas con Aplicaciones en Telecomunicaciones". Director: Dr. Juan Cousseau. Vigencia: 2009-2011 (3 años).

Referencias

- [1] T. Schenk, *RF Impairments in Multiple Antenna OFDM: Influence and Mitigation*, PhD dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, 2006. ISBN 90-386-1913-8. 291 p.
- [2] F. H. Gregorio, "Analysis and compensation of nonlinear power amplifier effects in multi-antenna OFDM systems," Ph.D. dissertation, Helsinki Univ. Technol., Espoo, Finland, Nov. 2007.
- [3] G. Fettweis, "Dirty RF: A new paradigm", in *Proc. 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005*, September 2005, pp. 2347-2355, Vol. 4.
- [4] H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg, and A. Paulraj, "A fourth generation of MIMO-OFDM broadband wireless system: Design, performance and field trial results," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 9, pp. 141 – 149, Sept. 2002.
- [5] G. Stuber, J. Barry, S. McLaughlin, Y. Li, M. Ingram, and T. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 271–294, Feb. 2004.
- [6] E. Hossain, D. In Kim and V. K. Bhargava, *Cooperative Cellular Wireless Networks*, Cambridge University Press, April 2011.
- [7] Goldsmith, "Capacity limits of MIMO Channels," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 21, no. 5, June 2003
- [8] M. Dohler, *Virtual antenna arrays*, Ph.D. dissertation, King's College London, London, UK, 2003.
- [9] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 4th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, Jan. 2006.
- [10] Y. Zou, M. Valkama, and M. Renfors, "Digital compensation of I/Q imbalance effects in space-time coded transmit diversity systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 6, pp. 2496–2508, June 2008.
- [11] D. Petrovic, W. Rave, and G. Fettweis, "Effects of phase noise on OFDM systems with and without PLL: Characterization and compensation," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 55, No. 8, pp. 1607-1616, August 2007.
- [12] R. Rao and B. Daneshrad, "Analog impairments in MIMO-OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 50, no. 12, pp. 3382 – 3387, Dec. 2006
- [13] Tarighat and A. H. Sayed, "MIMO OFDM receivers for Systems with IQ imbalances," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 9, pp. 3583–3596, Sept. 2005.
- [14] Y. Zou, M. Valkama, and M. Renfors, "Digital compensation of I/Q imbalance effects in space-time coded transmit diversity systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 6, pp. 2496–2508, June 2008.
- [15] J. Qi and S. A'issa, "Beamforming for MIMO transmit-receive Diversity systems with crosstalk," in *Proc. IEEE International Conf. on Commun. (ICC'10)*, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [16] J. Qi and S. A'issa, "Optimal beamforming in MIMO systems with HPA nonlinearity," in *Proc. IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC'10)*, Istanbul, Turkey, Sept 2010, pp. 910–914.
- [17] J. Qi and S. A'issa, "Analysis and compensation of power amplifier nonlinearity in MIMO transmit diversity systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2921–2931, July 2010.
- [18] S. A. Bassam, M. Helaoui, and F. M. Ghannouchi, "Crossover digital predistorter for the compensation of crosstalk and nonlinearity in MIMO transmitters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 5, pp. 1119–1128, May 2009.
- [19] F. Gregorio, J. Cousseau, S. Werner, R. Wichman and Taneli Rihonen "Predistorter with IQ imbalance and crosstalk compensation for broadband MIMO OFDM transmitters", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Special issue: Precoding and Transmitter-Side Processing Techniques for Multiuser MIMO OFDM Systems with Special Emphasis on the PAPR Problem, IN PRESS
- [20] A. Baschiroto, R. Castello, F. Campi, G. Cesura, M. Toma, R. Guerrieri, R. Lodi, L. Lavagno, and P. Malcovati, "Baseband analog front-end and digital back-end for reconfigurable multi-standard terminals," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 8 – 28, 2006.
- [21] Pui In Mak, Seng-Pan U and R. P. Martins, "Transceiver architecture selection: Review, state-of-the-art survey and case study," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 6 – 25, 2007.
- [22] Zhi Ning Chen & Kwai Man Luk, "Antennas for Base Stations in Wireless Communications" McGraw Hill 2009.
- [23] Lal Godara, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations". *Proc. of IEEE*, Vol. 85 No. 7 July 1997.
- [24] Lal Godara, "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam Forming and Direction of Arrival Considerations". *Proc. of IEEE*, Vol. 85 No. 8 August 1997.