

Comunicación Molecular: Retos y oportunidades

Mayteé Zambrano

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá

Resumen: *La comunicación molecular permite el envío de información a través de moléculas u otras partículas a escala de nanómetros a micrómetros. La misma posee limitaciones como: degradación de las partículas en el medio acuoso durante la propagación y retardo de la señal de información recibida debido al movimiento browniano de las partículas. En este artículo se describen los fundamentos más relevantes de un sistema de comunicación molecular incluyendo retos, limitaciones y aplicaciones en la que esta tecnología tendría un impacto relevante. Se presentan los aspectos significativos del canal de comunicaciones, tipos de modulación y herramientas de modelaje de sistemas de comunicación molecular.*

Palabras Claves: *comunicación molecular, difusión, modulación basada en concentración de partículas, Nano-dispositivos, señales bioquímicas.*

Title: *Efficient wireless sensor networks for agroindustry*

Abstract: *The molecular communication allows sending information through molecules or other particles of nanometer to micrometer scale. It has limitations as: particles degradation in the aqueous or fluid medium during propagation, and the delay in the received signal due to Brownian motion of the particles. In this article the most important foundations of molecular communication system including challenges, limitations and applications where this technology would have a significant impact are described. Significant aspects of the communications channel, modulation types and modeling tools of molecular communication systems are presented.*

Key words: *molecular communication, diffusion, modulation based on concentration of particles, Nano-devices, biochemical signal.*

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 14 de agosto de 2015

Fecha de aceptación: 3 de diciembre de 2015

1. Introducción

Los sistemas de comunicaciones modernos suplen la demanda creciente de información ubicua de la sociedad actual mediante señales eléctricas o electromagnéticas. Sin embargo, existen aplicaciones en las cuales esto es ineficiente e inapropiado,

como por ejemplo en dimensiones extremadamente pequeñas. Este es el caso de la comunicación entre robots de escala micro o nano debido a restricciones en el tamaño de las antenas y la longitud de onda de la señal electromagnética. De estas limitaciones de los sistemas por propagación electromagnética surge la necesidad de buscar sistemas de comunicación innovadores que utilicen otro tipo de propagación.

Paralelamente los avances en nanotecnología, que hacen posible la miniaturización de muchos dispositivos, el desarrollo en biotecnología y los adelantos de la micro-robótica, donde el diseño de dispositivos que realizan ciertas tareas ha comenzado a mostrar resultados positivos [1], crean las condiciones favorables para reducir el tamaño de los sistemas de información. De toda esta sinergia surge la idea de los sistemas moleculares a escala de micrómetros a nanómetros basados en la comunicación existente en sistemas vivos a nivel molecular.

En el ámbito nanoescalar existen dos corrientes que científicamente se han desarrollado: la comunicación electrónica vía señal electromagnética con la ayuda de material novedoso en nano escala como grafeno o los nanotubos de carbón [2] y la comunicación molecular (CM) [3]. La primera tiene un futuro muy dependiente de los avances en nanotubos de grafeno y la segunda es una novedosa idea que requiere del desarrollo y adaptación de toda la tecnología de comunicaciones bajo condiciones específicas.

La CM se inspira en la comunicación a través de señales químicas que usan los seres vivos donde la información es llevada por partículas pequeñas como: moléculas, bacterias y aquellas que usan como transporte medios acuosos o gaseosos. En CM una vez la partícula de información llega al receptor, esta es detectada y decodificada por un proceso bioquímico para descifrar la información previamente codificada en el transmisor [3]. CM tiene 2 ventajas principales sobre los sistemas de comunicación por radio propagación: la compatibilidad biológica y la eficiencia energética de los procesos bioquímicos con baja dispersión de calor. Sin embargo, las teorías de comunicaciones actuales no pueden ser implementadas directamente debido a las variantes en el canal, el tipo de señal de información y la escala nanométrica con respecto a los sistemas de información convencionales.

Los avances desarrollados en CM son de suma importancia para aplicaciones médicas (administración de fármacos, detección y control de enfermedades), ciudades inteligentes (utilización de biología sintética para cambiar la tonalidad en árboles a resplandecientes), en la agroindustria (sensores integrados a plantas y/o productos derivados para control y monitoreo).

CM es un campo novedoso y multidisciplinario que requiere de varias ciencias como: la biología, biotecnología e ingeniería de comunicaciones para superar las limitaciones y retos a los

que se enfrenta. En este artículo se presenta una descripción general de los sistemas de CM incluyendo componentes del sistema por etapas, aplicaciones, ventajas y desventajas. Se resaltan los aspectos más relevantes de CM para familiarizarnos con sus fundamentos físicos, así como las particularidades de su diseño ingenieril. Adicionalmente se señalan los retos y limitaciones que aún son objeto de estudio y herramientas de modelaje entre otros aspectos. En la sección 2 de este artículo se define CM con sus características propias, incluyendo la descripción del modelo de CM con sus elementos. En la sección 3 se plantean los tipos de modulación propuestos para CM, mientras que en la sección 4 se detallan los avances y análisis de capacidad del canal de CM. En la sección 5 se presentan posibles aplicaciones, ventajas y desventajas de un sistema de CM y las herramientas más relevantes de modelaje para finalizar en la sección 6 con las conclusiones.

2. Sistema de Comunicación Molecular

CM es un nuevo paradigma de comunicación entre partículas biológicas o dispositivos diminutos que llevan información a cortas distancias en medios acuosos o gaseosos. Es decir, consiste en la emisión y recepción de señales de información mediante moléculas biológicas, bio-sintéticas o nano-máquinas. En la Figura 1 se describe un sistema de CM donde puede observarse que, al igual que en los sistemas convencionales de comunicación, CM contiene los tres componentes principales: transmisor, receptor y canal.

Transmisor: En CM la información está contenida en partículas a nivel de micrómetros a nanómetros. Estas partículas pueden ser compuestos biológicos (las proteínas) o compuestos sintéticos (nano partículas de carbón u oro) [4-6]. Ejemplos de estas partículas de información son: ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (ARN), hormonas, feromonas, proteínas, péptidos, virus, células genéticamente alteradas, células artificiales y dispositivos de escala diminuta. El transmisor provee la energía necesaria para la generación y almacenaje de partículas. De igual forma, procesa y controla la cantidad, tipo o concentración de partículas en CM. El transmisor contiene el mecanismo de emisión de las partículas al medio una vez la unidad de control le indica el tiempo de liberación. La codificación y modulación seleccionada son funciones que se realizan dentro del transmisor. Son varios los mecanismos de modulación planteados los cuales serán descritos adelante. También se han propuesto diversos métodos de implementación de acciones lógicas y de memorias con células vivas los cuales pueden ser utilizados por el transmisor y receptor como unidades de procesamiento y control [7].

Canal: es un ambiente acuoso o gaseoso donde las partículas diminutas se propagan. Los mecanismos de

propagación propuestos son: difusión libre, difusión por el primer golpe, propagación asistida en flujo, propagación asistida por bacterias, propagación neuroquímica, kinesinas sobre microtúbulos, motilidad de microtúbulos sobre kinesinas estacionarias, propagación a través de la unión de brechas, propagación mediante el uso de motores moleculares, entre otros [3,8,9].

Los mecanismos de propagación pueden ser clasificados por su arquitectura como [8,10-12]:

- **Arquitecturas basadas en el caminar sobre una vía específica a través de sustancias portadoras**, como por ejemplo: los motores moleculares y motores de bacteria. Se logra predecir claramente la ruta o recorrido de la información.
- **Arquitecturas basadas en el flujo** en donde las moléculas viajan por difusión sobre un fluido que es predecible en flujo y turbulencia. Estas arquitecturas también pueden utilizar un portador con movimiento limitado en promedio sobre una ruta. Ejemplos: la comunicación de hormonas en la sangre y la comunicación de feromonas en una colonia de hormigas.
- **Arquitecturas basadas en difusión** en donde las moléculas se propagan a través de su movimiento natural espontáneo de difusión pero que es afectado por turbulencias en el fluido en el que se desplazan.

El canal introduce ruido resultante de la degradación por: la propagación aleatoria debido al movimiento browniano de las partículas, las turbulencias del fluido en el que se propagan y las reacciones químicas con otras moléculas o el medio que degradan las partículas de información.

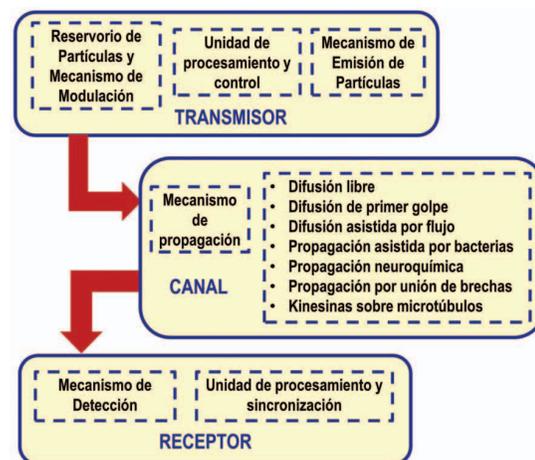


Figura 1. Componentes de un sistema de comunicación molecular.

Receptor: contiene sensores o detectores que pueden medir la presencia o falta de información en las partículas que recibe.

Entre sus funciones también están la corrección y detección en caso de errores causados por el retardo por turbulencia o choque de partículas. Contiene mecanismos para medir el nivel de concentración de cada partícula y distinguir entre diferentes tipos. Los procesos de recepción han sido analizados por absorción y síntesis. En [13-14] se presentan receptores para moléculas específicas los cuales son sintetizados dentro de una célula. Otra opción es colocar todos los componentes dentro de una célula sintética. De igual forma se ha planteado la posibilidad de utilizar material magnético como una perturbación que se propaga como ondas spin, o el uso de procesamiento a escala de nanómetros [15].

3. Tipos de Modulación

Los sistemas CM se basan en la propagación de moléculas o partículas de información mediante difusión. Al igual que en comunicación convencional digital, los símbolos son enviados con la intención de ser decodificados al receptor. Diferentes técnicas de modulación pueden ser usadas para el mapeo o representación gráfica entre la molécula en el receptor y el símbolo recibido. El símbolo puede ser modulado tomando en cuenta las propiedades de la molécula mensajera que llega al receptor (ejemplo: concentración, frecuencia, fase, tipo de molécula) para formar o reconstruir la señal de información. Entre las modulaciones propuestas tenemos:

- **Modulación por Desplazamiento de Concentración (CSK):** consiste en la emisión de un número de moléculas de un mismo tipo que conllevan la información. En CSK la concentración de la molécula recibida representa la amplitud de la señal. CSK es el análogo a ASK en los sistemas de comunicación convencional. CSK puede ser implementada en la práctica como BCSK (caso binario) o multinivel MCSK dependiendo de la velocidad por símbolo escogida y del número de moléculas liberadas. Esta técnica también contiene, la forma más simple OOK que es el desplazamiento de encendido y apagado que representa el envío o no de partículas o moléculas de información [16]. El receptor decodifica los símbolos utilizando diferentes niveles de concentración de acuerdo a la cantidad de bits por símbolo en un sistema multinivel MCSK, como se muestra en la Figura 2. CSK es afectada por interferencia entre símbolos (ISI por sus siglas en inglés) debido a los excedentes de moléculas anteriores, retardos en la llegada de las partículas de información y/o reacciones químicas que cambian los niveles de concentración. En el intento por mejorar el efecto de la ISI se propone la modificación Zebra-CSK [17], la cual usa 2 tipos de moléculas: las moléculas mensajeras para codificar la información en símbolos y las moléculas para inhibir los residuos de símbolos anteriores. En esa búsqueda por reducir la ISI se propone la variación

de CSK utilizando 2 tipos de moléculas conocida como desplazamiento por transición de molécula (MTSK) [18].

- **Modulación por Desplazamiento de Molécula (MoSK):** es una técnica en la que se emiten diferentes tipos de moléculas las cuales representan la información. $2n$ tipos de moléculas o partículas de información son necesarias para enviar n bits por símbolo y obtener a multinivel MoSK (MMoSK). La emisión o liberación de partículas depende del símbolo a enviar y la detección en el receptor de la concentración en un intervalo específico. Al igual que en CSK, los excedentes de cualquier partícula de símbolos anteriores causa ISI aunque MMoSK presenta este problema en menor grado que CSK [16]. Su mejor rendimiento frente a la ISI complica los diseños del receptor y transmisor debido a que el mecanismo molecular es más complejo y requiere de técnicas de codificación y detección bioquímicas certeras para reducir o eliminar errores.
- **Modulación Basada en el Radio Molecular:** adicional a las técnicas propuestas, en [19] se propone una nueva técnica de modulación basada en el radio molecular (IRSK por sus siglas en inglés) utilizando isómeros como partículas de información, específicamente *aldohexosas*. La información es codificada utilizando radio de las moléculas mensajeras. El esquema más simple desarrollado requiere el uso de 2 tipos de moléculas, siendo el mismo más robusto frente a ISI y presenta un diseño del receptor menos complejo en comparación con CSK bajo el mismo tipo de moléculas.

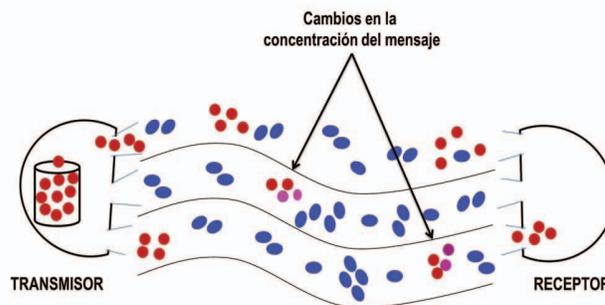


Figura 2. Funcionamiento de una modulación multinivel de CSK.

- **Modulación por tiempo transcurrido (TEC por sus siglas en inglés de Time-Elapse Communication):** esquema para sistemas de propagación muy lento como comunicación de bacterias dentro de un chip. En esta técnica la información es codificada mediante el intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos, específicamente en [20] se demuestra mediante fluorescencia en bacterias.

4. Capacidad del Canal

En un canal de sistema de comunicación con ruido las variables para medir su rendimiento son: la tasa de información alcanzable y la capacidad del canal [21]. La tasa de información alcanzable o información mutua es una medida teórica de cuantos bits pueden ser transmitidos a través de un canal en un período dado. Mientras la capacidad de canal es la tasa de información máxima alcanzable que es el número máximo de bits de transmisión que puede ser transferida a través del canal en un período dado [21].

Generalmente para un sistema sin memoria la tasa de información alcanzable puede ser utilizada para maximizar la capacidad del canal. La complejidad en CM recae en que es un sistema con memoria a diferencia de los sistemas convencionales de comunicación que no tienen memoria. Adicional en sistemas CM, dependiendo del mecanismo de propagación y de las partículas o moléculas de información seleccionadas para nuestro sistema, la respuesta del canal varía. Debido a esto no existe una definición única de la capacidad del canal a causa de lo impredecible de CM. Son varios los estudios que se han hecho para diferentes medios de propagación y/o partículas de información, como por ejemplo: capacidad de CM por difusión en un medio gaseoso a través de expresiones de forma cerrada del límite inferior de la capacidad del canal [22]; capacidad del canal en 1D y 3D para un sistema CM con propagación por difusión del primer golpe mediante expresiones de forma cerrada [23-24]; estudio determinístico de la capacidad del canal para un sistema de comunicación por difusión con células genéticamente modificadas que se mueven por sí mismas [25]; análisis de un sistema CM entre 2 nodos de colonias de bacterias a través de la generación de luz fluorescente [26]; medición de la tasa de información alcanzable de un sistema OOK binario de difusión molecular [27], capacidad del canal de CM con propagación a través de la unión de brechas para moléculas de señalización de calcio [28] y para comunicación entre cardiomiocitos [29].

En los sistemas de comunicaciones convencionales la codificación de canal se utiliza para combatir problemas como ruido aditivo y desvanecimiento, ya que introduce redundancia para la corrección y detección de errores. La regla de decodificación óptima para un canal es el equivalente a la distancia mínima entre dos palabras de código [21]. En la mayoría de los sistemas de comunicación de propagación electromagnética es utilizada la distancia de Hamming pero para los sistemas de CM esa distancia debe redefinirse debido al efecto codependiente de las partículas de información y el medio de propagación. En [30] se define una métrica para la distancia molecular desde la perspectiva de probabilidad para alcanzar una decodificación de canal favorable.

5. Aplicaciones y modelado de Sistemas de CM

En esta sección se detallan brevemente las aplicaciones, ventajas y desventajas de un sistema de CM. Adicional se mencionan las herramientas informáticas más utilizadas para el modelado y simulación de sistemas de CM.

Aplicaciones: Existen un gran número de posibles aplicaciones para comunicación molecular en diferentes escenarios, tales como:

- **Salud:** administración dirigida de fármacos, liberación de medicación adaptativa, monitoreo de salud mediante la identificación de sustancias tóxicas, medicina regenerativa para la reconstrucción de tejidos u órganos dañados, ingeniería genética mediante manipulación genética.
- **Aplicaciones Ambientales:** monitoreo ambiental para detección de toxinas o contaminantes, degradación de materiales no deseados o contaminantes, detección de reacciones químicas contaminantes por residuos no deseados.
- **Manufactura:** control de calidad mediante la identificación de defectos en los productos, construcción precisa de componentes, integrar nano redes en nuevos productos.
- **Otras:** monitoreo de infraestructuras, estudio y control del comportamiento de animales y plantas, uso de nanorobot para múltiples áreas.

Ventajas: CM presenta una serie de ventajas como:

- **Factibilidad:** a pesar de los retos que presenta se considera un sistema más fácil de implementar en corto plazo.
- **Escala:** tamaño apropiado para utilizar nano-máquinas.
- **Bio-compatibilidad:** integración con sistemas vivos es posible (No está garantizado).
- **Eficiencia energética:** reacciones bioquímicas tiene una alta eficiencia.

Desventajas: CM presenta algunas limitaciones o retos como:

- **Aleatoriedad:** propagación aleatoria de las moléculas lo que representa ruido ambiental del sistema.
- **Retardo:** los tiempos de propagación son muy largos comparados con la velocidad de la luz.
- **Alcance o cobertura:** algunas técnicas propuestas pueden tener rangos prácticos muy cortos.
- **Fragilidad:** los componentes biológicos pueden ser sensitivos a su ambiente (temperatura, PH y otros agentes). Otras ventajas y desventajas dependerán de la aplicación específica.

Herramientas de Simulación: La experimentación de sistemas de CM sobre un laboratorio requiere de equipos de alta tecnología y de un alto grado de precisión a escala nano. Esto incrementa los costos de equipos de experimentación así como también los costos asociados a manipulación y

adquisición de partículas de información ya sean una señal biológica, sintética o nano dispositivos. La experimentación es el paso primordial antes de la implementación y con la finalidad de optimizar recursos se han desarrollado herramientas de modelado biológico-ingenieril con características reales a micro-nano escala con la finalidad de modelar para verificar y analizar el rendimiento de los avances planteados antes de la experimentación. Entre los simuladores más relevantes encontramos:

- **dmCS:** simulador de comunicación molecular distribuido basado en arquitectura de alto nivel [31].
- **NanoNs:** es un simulador de nano redes moleculares el cual fue creado basado en el simulador de redes ns-2 [32].
- **N3Sim:** simulador para sistemas de comunicación molecular que permite evaluar el rendimiento bajo un nivel de concentración específico con múltiples transmisores y receptores [33].
- **MUCIN:** simulador basado en MATLAB de sistemas de CM de extremo a extremo que utilizan sistemas de propagación por difusión del primer golpe. Permite evaluar el rendimiento ante ISI de sistemas de una o tres dimensiones [34].
- **BNSim:** simulador para sistemas de CM entre bacterias de código abierto, paralelo, estocástico, y la plataforma de modelado multi-escala que integra diversos algoritmos de simulación, junto con circuitos genéticos y modelos vía química tácticos en un entorno 3D complejo [35].

6. Conclusiones

Los sistemas de CM son un nuevo paradigma que ofrece una alternativa a la comunicación a nivel nanométrico con un alto grado de aplicabilidad en muchos campos como se menciona. Sin embargo, aún presenta una gran cantidad de retos y limitaciones que sobrepasar como es el caso de la experimentación para la validación de resultados obtenidos computacionalmente. La naturaleza de CM hace necesario la colaboración interdisciplinaria y multidisciplinaria para desarrollar la tecnología de comunicación basada en difusión, es especial de las áreas de biología, biotecnología y comunicaciones. Desde el punto de vista ingenieril, hace falta estudiar más a fondo las técnicas de corrección y detección de errores, capacidad del canal y codificación de canal debido a que estos temas muestran menor desarrollo científico.

Referencias

[1] A. I. F., Brunetti, F., & C. Blázquez, Nanonetworks: A new communication paradigm. *Computer Networks*, Vol. 52, No.12, pp. 2260-2279, 2008.

[2] J. K., Weldon, J., Garcia, H., & A. Zettl. Nanotube radio. *Nano letters*, Vol. 7, No. 11, pp. 3508-3511, 2007.

[3] N. T., Eckford, A. W., & T. Haraguchi. *Molecular communication*. Cambridge University Press, 2013.

[4] L. You, R. S. Cox, R. Weiss, and F. H. Arnold. "Programmed population

control by cell-cell communication and regulated killing,"*Nature*, vol. 428, pp. 868-871, Apr. 2004.

[5] S. Basu, Y. Gerchman, C. H. Collins, F. H. Arnold, and R. Weiss. "A synthetic multicellular system for programmed pattern formation,"*Nature*, vol. 434, pp. 1130-1134, Apr. 2005.

[6] M. J. Doktycz and M. L. Simpson. "Nano-enabled synthetic biology," *Wiley Mol. Syst. Biol.*, vol. 3, July 2007.

[7] P. Siuti, J. Yazbek, and T. K. Lu. "Synthetic circuits integrating logic and memory in living cells," *Nat. Biotechnol.*, vol. 31, pp. 448-452, May 2013.

[8] N. Farsad, H. B. Yilmaz, A. Eckford, C. B. Chae, and W. Guo. *A Comprehensive Survey of Recent Advancements in Molecular Communication*. Oct 2014, arXiv preprint arXiv:1410.4258.

[9] H. C. Berg. *Random walks in biology*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1993.

[10] T. Nakano, T. Suda, T. Koujin, T. Haraguchi, and Y. Hiraoka. "Molecular communication through gap junction channels," in *Trans. Comput. Syst. Biol. X* (C. Priami, F. Dressler, O. B. Akan, and A. Ngom, eds.), vol. 5410 of Springer Lect. Notes Comput. Sci., pp. 81-99, 2008.

[11] M. Pierobon and I. F. Akyildiz. "A physical end-to-end model for molecular communication in nanonetworks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, pp. 602-611, May 2010.

[12] M. Pierobon and I. F. Akyildiz. "Capacity of a diffusion-based molecular communication system with channel memory and molecular noise," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, pp. 942-954, Feb. 2013.

[13] D. Hymel and B. R. Peterson. "Synthetic cell surface receptors for delivery of therapeutics and probes," *Elsevier Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 64, pp. 797-810, June 2012.

[14] H. Shankaran, H. Resat, and H. S. Wiley. "Cell surface receptors for signal transduction and ligand transport: A design principles study," *PLoS Comput. Biol.*, vol. 3, p. e101, June 2007.

[15] S. Das, A. J. Gates, H. A. Abdu, G. S. Rose, C. A. Picconatto, and J. C. Ellenbogen. "Designs for ultra-tiny, special-purpose nanoelectronic circuits," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 54, pp. 2528-2540, Nov. 2007.

[16] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu, I. F. Akyildiz. "Modulation Techniques for Communication via Diffusion in Nanonetworks" in *Proc. Int. Conf. on Communications (ICC)*, pp. 1-5, June 2011.

[17] S. Pudasaini, S. Shin, and K. Sup Kwak. "Robust Modulation Technique for Diffusion-based Molecular Communication in Nanonetworks." arXiv preprint arXiv:1401.3938 (2014).

[18] B. Tepekule, A. E. Pusane, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu. "A novel modulation technique in diffusion based molecular communication and its performance analysis," in *Proc. IEEE Signal Process. and Commun. Appl. Conf. (SIU)*, pp. 1110-1113, 2014.

[19] N.-R. Kim and C.-B. Chae. "Novel modulation techniques using isomers as messenger molecules for nano communication networks via diffusion," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, pp. 847-856, Dec. 2013.

[20] D. Kilinc and O. B. Akan. "Receiver design for molecular communication," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, pp. 705-714, Dec. 2013.

[21] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory* 2nd Edition. Wiley-Interscience, second ed., July 2006.

[22] M. Pierobon, and I. Akyildiz. "Capacity of a diffusion-based molecular communication system with channel memory and molecular noise," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 59, No. 2, pp. 942-954, 2013.

[23] A. W. Eckford, "Nanoscale communication with brownian motion." in *Proc. Conf. on Inf. Sci. and Syst. (CISS)*, (Baltimore, MD), pp. 160-165, 2007.

[24] H. B. Yilmaz, A. C. Heren, T. Tugcu, and C.-B. Chae. "Three dimensional channel characteristics for molecular communications with an absorbing receiver," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, pp. 929-932, June 2014.

[25] B. Atakan and O. B. Akan. "Deterministic capacity of information flow in

- molecular nanonetworks," Elsevier Nano Commun. Netw., vol. 1, pp. 31–42, Mar. 2010.
- [26] A. Einolghozati, M. Sardari, and F. Fekri. "Design and analysis of wireless communication systems using diffusion-based molecular communication among bacteria," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, pp. 6096–6105, Dec. 2013.
- [27] D. Ariffer. "Capacity analysis of a diffusion-based short-range molecular nano-communication channel," Elsevier Comput. Netw., vol. 55, pp. 1426–1434, Apr. 2011.
- [28] A. C. Heren, M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu. "Channel capacity of calcium signalling based on inter-cellular calcium waves in astrocytes," in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. Workshops (ICC WKSHP), pp. 792–797, 2013.
- [29] D. Kilinc and O. B. Akan. "An information theoretical analysis of nanoscale molecular gap junction communication channel between cardiomyocytes," IEEE Trans. Nanotechnol., vol. 12, pp. 129–136, Mar 2013.
- [30] P. C. Yeh, K. C. Chen, Y. C. Lee, L. S. Meng and others. "A new frontier of wireless communication theory: diffusion-based molecular communications". IEEE Wireless Communications, Vol. 19, No.5, pp 28-35, 2012.
- [31] A. Akkaya, and T. Tugcu. "dMCS: distributed molecular communication simulator," Proc. 8th Int. Conference on Body Area Networks, pp. 468-471, Sept 2013.
- [32] G. E., Atakan, B., & Akan, O. B. NanoNS: A nanoscale network simulator framework for molecular communications. Nano Communication Networks, 1(2), 138-156, 2010.
- [33] I. Llatser, D. Demiray, A. Cabellos-Aparicio, D., Altılar and E. Alarcón, N3Sim: Simulation framework for diffusion-based molecular communication nanonetworks," Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 42, pp. 210-222, 2014.
- [34] H. Yilmaz and C. Chae, "Simulation study of molecular communication systems with an absorbing receiver: Modulation and ISI mitigation techniques," Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 49, pp. 136-150, 2014.
- [35] G. Wei, P. Bogdan, and R. Marculescu, "Efficient modeling and simulation of bacteria-based nanonetworks with bnsim," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, No. 12, pp. 868-878, 2013.