

# Uma Revisão das Implementações de Sistemas Cooperativos na Indústria e na Academia

Rubinaldo Novais, Cláudio F. Dias e Gustavo Fraidenraich

**Resumo**—Nos últimos anos houve uma explosão de interesse sobre pesquisas na área de comunicação *Wireless* cooperativa. Este artigo apresenta uma revisão sobre tópicos importantes que relacionam as melhorias prometidas pelas comunicações cooperativas analisadas na teoria e seu resultado em ambientes realísticos. Este trabalho não tem a intenção de ser exaustivo, mas pretende servir como um mapa que representa uma amostra dos resultados mais recentes e relevantes da área. A ênfase inicial será sobre a cooperação aplicada na indústria dos dispositivos móveis e conclui avaliando como a academia desenvolveu recursos para testar e avaliar os ganhos prometidos pela teoria.

**Palavras-Chave**—Cooperação, MIMO, Virtual Antenna Array, Relay.

**Abstract**—In the last years, there has been an upsurge of research interest in cooperative wireless communications. This article presents an overview about important topics related with the promised theoretical gains of cooperative communications and their results in real environments. This work does not intend to be exhaustive but can serve as a roadmap to the most recent and relevant results in the area. The initial emphasis will be about the applied cooperation in the mobile industry and it concludes with the evaluation of how academy developed resources to test and check the gains promised by theory.

**Keywords**—Cooperation, MIMO, Virtual Antenna Array, Relay.

## I. INTRODUÇÃO

O congestionamento do espectro de radiofrequência e a demanda exponencial por velocidade na transmissão de dados em redes sem fio têm motivado a comunidade científica e a indústria a buscar soluções inovadoras para aumentar a eficiência espectral dos enlaces sem fio. Importantes avanços neste sentido foram obtidos com a tecnologia Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), que incorpora diversidade de transmissão e recepção através da utilização de múltiplas antenas e que está consolidada como uma das tecnologias-chave nas novas gerações de redes sem fio. Além disso, os sistemas MIMO representam um marco histórico em que a teoria da informação de Shannon para o limite da capacidade do canal é estendida para o domínio espacial [1]. A aplicação de STC (Space Time Code) tem um extraordinário ganho em eficiência espectral, embora custe um aumento na complexidade das estruturas transceptoras. Métodos de diversidade de transmissão com a tecnologia MIMO já foram especificados em vários padrões, como IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX) e 3GPP Long Term Evolution (LTE).

Entretanto, em alguns cenários, a utilização de múltiplas antenas em dispositivos móveis não é viável devido às

limitações de tamanho, custo, hardware ou consumo de energia. Os dispositivos móveis da rede de telefonia celular, que sofrem grande pressão de mercado por miniaturização e baixo consumo de energia, são um exemplo de inviabilidade de utilização de múltiplas antenas [2]. A ideia alternativa de se utilizar cooperação tornou-se atrativa quando associada a alguns aspectos do mundo das múltiplas antenas. Ao revisar os ganhos os quais podem ser alcançados por sistemas cooperativos temos que, por exemplo, ao considerar múltiplos nós de transmissão tem-se um ganho devido a segmentação dos múltiplos percursos de propagação que, devido ao comportamento não linear da perda de percurso, produzirá um ganho de potência. Considerando que os nós geralmente estão afastados, estes transmissores podem prover cópias adicionais da mesma informação por canais com desvanecimento e sombreamento diferentes produzindo-se ganhos de diversidade. Já a coordenação síncrona dos nós pode levar a ganhos de multiplexação podendo ter uma taxa de dados alcançável ao valor proporcional do logaritmo da SNR quando em regime assintótico [1]. A taxa ou ganho de multiplexação, neste caso, está associado ao número de graus de liberdade do canal que é o número de canais independentes sobre os quais informações diferentes podem ser enviadas.

Neste contexto, as técnicas de comunicação cooperativa são apontadas como alternativas promissoras que permitem que dispositivos explorem a diversidade de transmissão mesmo com uma única antena. De fato, a intensa produção científica e o entusiasmo acadêmico observado na última década demonstram que a comunicação cooperativa ocupa uma importante posição no panorama tecnológico das comunicações sem fio do século XXI [3]. Além disso, ganhos extras podem ser conseguidos quando associa-se a cooperação com sistemas MIMO. Um passo lógico que vai além é, portanto, implementar um sistema espaço-temporal cooperativo distribuído. Fundamentalmente, comunicações cooperativas podem ser vistas como um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas virtuais, o qual capacita dispositivos de apenas uma antena cooperarem com outros para formar um sistema de múltiplas antenas. Através desta cooperação é possível então obter os benefícios da diversidade de cooperação dos sistemas MIMO sem o custo de ter um arranjo físico de antenas em cada terminal.

## II. SISTEMAS COOPERATIVOS NA INDÚSTRIA

O LTE-Advanced (LTE-A) é a denominação dada pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) para as versões 10 em diante do padrão Long Term Evolution (LTE) que foram desenvolvidas para atender aos requisitos estabelecidos pelo

ITU (International Telecommunication Union) para a quarta geração (4G) de redes móveis IMT-Advanced. Atualmente o mercado de telecomunicações está implementando a rede LTE que corresponde às versões 8 e 9 do padrão 3GPP LTE.

Os requisitos de eficiência espectral, latência e taxa de transmissão especificados pelo IMT-Advanced serão atendidos pela incorporação dos seguintes componentes tecnológicos nas versões 10 e 11 do padrão LTE: agregação de portadoras, avançado sistema de transmissão e recepção com múltiplas antenas, redes heterogêneas e a funcionalidade Coordinated Multi-Point Transmission (CoMP) [4]. A seguir discute-se sobre as técnicas de comunicação cooperativa empregadas nos nós retransmissores das redes heterogêneas e na funcionalidade CoMP.

#### A. Redes Heterogêneas e Retransmissores

As redes móveis implementadas atualmente são largamente baseadas em macro-células, como representado na Fig. 1a. Estas redes são chamadas homogêneas porque todas as suas estações rádio-base são do mesmo tipo e classe de potência. Embora atualmente as macro-células sejam a base da cobertura das redes móveis, a implementação de nós de baixa potência (p.ex., pico- ou femtocells, ou nós retransmissores) dentro da cobertura da macro-célula é considerada a melhor solução para otimizar o desempenho da rede a um custo relativamente pequeno. Esta organização de rede, chamada rede heterogênea, é caracterizada por severa interferência inter-célula entre os nós macro e de baixa potência [5, 6]. Implementações de redes heterogêneas são ilustradas na Fig. 1b.

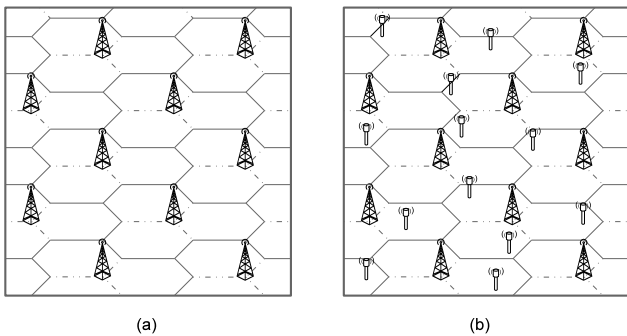


Fig. 1. Cenários de implementação de redes móveis: a) redes homogêneas; b) redes heterogêneas

Numa rede heterogênea, o nó retransmissor (RS, do termo em inglês *Relay Station*) é uma estação rádio-base de baixa potência que pode ser utilizada para estender a cobertura e aumentar a capacidade nas bordas das células ou para conectar áreas remotas sem conexão por fibra ótica. Os RSs poderão ainda ser utilizados para melhorar a qualidade de serviço e a capacidade dentro da cobertura da macro-célula. A arquitetura básica de retransmissão no LTE-Advanced é mostrada na Fig. 2.

O RS é conectado ao eNodeB Doador (Donor eNodeB, em inglês) pela nova interface de rádio  $U_n$ . Esta interface é uma modificação da interface de ar E-UTRAN  $U_u$  que suporta a transmissão entre o equipamento do usuário (UE, do termo em inglês *User Equipment*) e o eNodeB. Nos cenários de

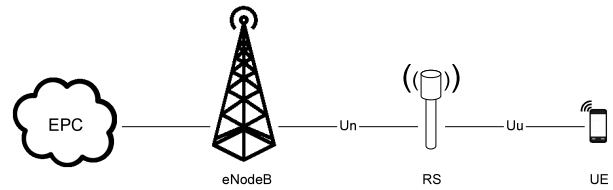


Fig. 2. Arquitetura de retransmissão na rede LTE-Advanced

retransmissão a interface  $U_u$  é usada também entre o UE e o eNodeB Doador [4]. As interfaces entre o eNodeB e o Evolved Packet Core (EPC) da rede LTE permanecem inalteradas.

Dois tipos de RSs foram especificados no 3GPP LTE-Advanced: Tipo I e Tipo II. O RS Tipo I auxilia um UE remoto, localizado a uma grande distância, à acessar o eNodeB Doador. O RS Tipo I terá uma identidade de célula (Cell ID) própria e deverá transmitir os canais de sincronização e símbolos de referência distintos. O objetivo do RS Tipo I é estender o sinal e aumentar a cobertura do serviço. O RS Tipo II, por outro lado, deve auxiliar um UE localizado dentro da cobertura de um eNodeB Doador a melhorar a sua qualidade de serviço e capacidade. Neste caso, o RS não possui uma identidade de célula própria e portanto não cria novas células de cobertura. O objetivo principal do RS Tipo II é aumentar a capacidade do sistema adicionando diversidade multi-percurso e ganhos de transmissão para os UE locais [6]. A Fig. 3 ilustra os cenários de implementação dos dois tipos de RSs.

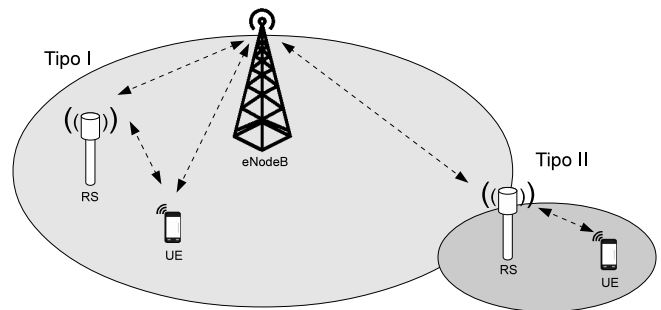


Fig. 3. Tipos de retransmissores rede LTE-Advanced

O 3GPP LTE-Advanced limitou o número de *hops* na rede formada entre os UEs e o eNodeB em dois. Esta rede de comunicação *dual-hop* pode ser estabelecida por diferentes estratégias de retransmissão. De maneira geral, os retransmissores que utilizam a estratégia de retransmissão AF (do termo em inglês *Amplify and Forward*) são conhecidos como repetidores ou retransmissores de camada 1 porque operam somente na camada física (PHY), amplificando os sinais RF recebidos e retransmitindo-os para o UE ou eNodeB. Estes retransmissores são amplamente usados atualmente nas redes 2G e 3G com o intuito de estender a cobertura em áreas montanhosas, ambientes internos e áreas com sombra de cobertura em geral.

Outra estratégia de retransmissão considerada para o LTE-Advanced é o DF (do termo em inglês *Decode and Forward*) em que os sinais são demodulados e decodificados pelo retransmissor e depois recodificados e modulados mais

uma vez antes de serem encaminhados para o destino. Os nós de retransmissão utilizando a estratégia DF podem ser categorizados como retransmissores de camada 2 ou camada 3, dependendo das funcionalidades do retransmissor [7]. No LTE-Advanced, retransmissores camada 3, chamados de *self-backhauling*, contém as mesmas funções de um eNodeB e são classificados como Tipo I [8].

Outro fator que influenciará a performance dos retransmissores nas redes LTE-Advanced é a estratégia de pareamento que definirá as regras para a seleção de RSs pelos UE em um cenário em que há múltiplos RSs numa célula [7, 9].

### B. Coordinated Multi-Point (CoMP)

As células nas redes sem fio convencionais operam de maneira semi-independente entre si, com transmissão/recepção independente de sinais para/de UEs em cada célula. Consequentemente, severa interferência inter-célula pode tornar-se um obstáculo fundamental de performance, particularmente para os usuários nas bordas das células. O gerenciamento de interferência tem se tornado um problema crítico devido à tendência atual de implementação de nós de baixa potência como solução para lidar com a demanda crescente de tráfego na comunicação móvel.

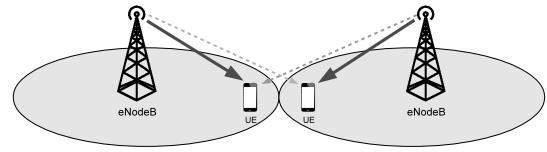
A transmissão/recepção multiponto coordenada (CoMP, do termo em inglês *Coordinated Multi-Point*) é uma maneira efetiva de gerenciar a interferência inter-célula e é considerada como uma tecnologia-chave do LTE-Advanced. As técnicas CoMP estão especificadas na versão 11 do 3GPP LTE-Advanced [10].

A funcionalidade CoMP é implementada pelo processamento conjunto ou transmissão coordenada entre eNodeBs servindo o UE na rede. No *downlink*, as técnicas aplicadas na funcionalidade CoMP são categorizadas em agendamento coordenado/*beamforming* (CS/CB, do termo em inglês *Coordinated Scheduling/Beamforming*), transmissão conjunta (JT, do termo em inglês *Joint Transmission*) e seleção de ponto de transmissão (TPS, do termo em inglês *Transmission Point Selection*). As três categorias são ilustradas na Fig. 4.

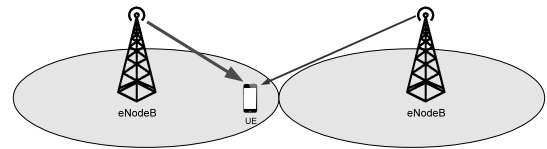
Na técnica CS/CB múltiplos pontos de transmissão (PT) compartilham somente informação de estado do canal (CSI, do termo em inglês *Channel State Information*) para múltiplos terminais UE, enquanto os pacotes de dados que precisam chegar ao UE estão disponíveis somente em um PT. Por outro lado, as técnicas JT e TPS caracterizam-se pela necessidade dos pacotes de dados estarem disponíveis em múltiplos PTs coordenados. Em particular, na técnica JT a mesma transmissão é realizada de dois ou mais PTs ao mesmo tempo e na mesma frequência. JT pode ser classificado ainda em coerente e não-coerente, dependendo se há combinação coerente dos sinais recebidos de múltiplos PTs ou não.

A técnica TPS pode ser considerada uma forma especial de transmissão conjunta, ou técnica JT, onde a transmissão para um certo terminal UE é realizada de um único PT a cada instante. A seleção do PT neste caso é feita dinamicamente a cada subquadro, de acordo com a condição de canal instantânea, de forma que as variações do canal são exploradas de maneira oportunística [10]. De acordo com a

(a) Agendamento Coordenado/*Beamforming* (CB/CS)



(b) Transmissão Conjunta (JT)



(c) Seleção de Ponto de Transmissão (TPS)

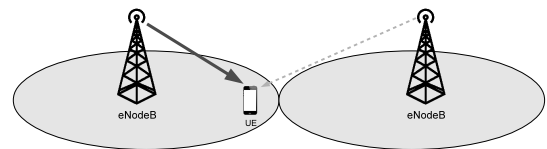


Fig. 4. Transmissão CoMP no *downlink*

especificação técnica do 3GPP para a funcionalidade CoMP [11], a seleção de ponto de transmissão poderá ser combinada com a supressão dinâmica do sinal de PTs com alta interferência, quando houver ganho na área de coordenação.

No *uplink*, a funcionalidade CoMP é implementada através de recepção conjunta (JR, do termo em inglês *Joint Reception*) e/ou agendamento coordenado (CS, do termo em inglês *Coordinated Scheduling*). O conceito básico do JR é utilizar antenas em diferentes localizações: os sinais recebidos por diferentes pontos de recepção (PR) são conjuntamente processados. Os dados recebidos precisam ser transferidos entre PRs, o que introduz requisitos de performance do enlace *backhaul* entre os PRs. Para o CS, as decisões de agendamento de UE no *uplink* são alinhadas entre os PRs na área de coordenação para minimizar a interferência. Neste caso não há muita sobrecarga no enlace *backhaul*, já que somente informação de CSI e alocação de recursos é compartilhada entre os PRs.

Em [10, 12] a funcionalidade CoMP é apresentada em mais detalhes e as técnicas avaliadas em vários cenários. Como mostrado em [10], somente uma parte das funcionalidades CoMP serão suportadas na versão 11 do 3GPP LTE-Advanced. Isso se deve em parte ao tempo limitado dos trabalhos de padronização mas também ao fato de que as técnicas CoMP ainda não estão maduras.

### III. APLICAÇÕES ACADÊMICAS PARA COOPERAÇÃO

Uma vez que os estudos teóricos e simulações apontam para resultados que demonstram uma melhora significativa dos sistemas de comunicação, há um grande empenho em aplicar os conceitos estudados na teoria e atingir os resultados prometidos.

Uma das primeiras formas que fizeram a diferença em estudos da área de cooperação foi com a adoção da prática

de construir *testbeds* para avaliar a diversidade cooperativa real em sistemas *wireless*. Alguns *testbeds* de comunicação cooperativa foram baseados em placas *wireless off-the-shelf*<sup>1</sup>. Por exemplo, em [13] o protocolo CoopMAC é implementado em um *driver open-source* para dispositivos baseados no padrão 802.11, e um conjunto de experimentos são conduzidos em um *testbed Off The Shelf* consistindo de até 10 estações. Outros tipos mais modernos empregam o conceito de sistemas *Software Defined Radio*[14, 15], que funcionam em tempo-real e são mais flexíveis, permitindo alterar características na camada *Media Access Control*(MAC) e física. O uso de sistemas em SDR tem sido muito importante para pesquisadores, pois muitos elementos de construção podem ser compartilhados sob licença *open-source* a qual permite a distribuição e modificação livre.

Similarmente, conforme desenvolvido em [16], um hardware comercial de baixo valor agregado (*commodity hardware*) foi usado para criar *relays* cooperativos, onde a cooperação foi limitada para uma seleção simples de pacotes da fonte ou *relay* e sem combinação de sinal. Os benefícios da diversidade foram observados pela verificação da quantidade de erros que foi notavelmente menor quando a cooperação era empregada. Embora, nesta situação, a diversidade de seleção demonstre uma vantagem quando se usa este hardware, por outro lado, há a desvantagem da limitação em flexibilidade para alterar características da MAC. Além disso, há o aspecto mais estrito em que é impossível alterar características da camada física, que é onde a comunicação cooperativa está localizada, impedindo a implementação de estruturas mais complexas como, por exemplo, a combinação dos sinais da fonte e *relay*.

Em [17], um experimento foi feito a partir da implementação completa de um *testbed* para um sistema de comunicação cooperativo do tipo *Amplify-and-forward*. O sistema é formado por uma camada física personalizada baseada na modulação OFDM e usa um esquema de transmissão distribuído utilizando um Código Espaço Temporal(STC) do tipo Alamouti em que o *relay* é responsável por enviar um dos ramos dos símbolos Alamouti codificados. A Fig. 5 ilustra a atividade do sistema nos instantes de transmissão.

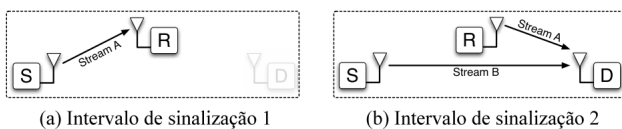


Fig. 5. Configuração dos nós e atividade dos terminais.[17]

O sistema foi construído utilizando recursos do *Wireless Open Access Research Platform*(WARP)[14] da Universidade de Rice e implementa um enlace *wireless* de alta velocidade, em tempo real. Um outro aspecto interessante apontado pelo trabalho é com relação a compatibilidade entre sistemas. Sendo o Alamouti um esquema que utiliza duas antenas transmissoras

<sup>1</sup>Produtos comerciais *Off The Shelf* são itens não desenvolvíveis que já existem, estão disponíveis para aquisição e podem ser modificados para servirem a outro fim. Muitos dos projetistas ficam entusiasmados em usar itens (se adequados para uso) *Off The Shelf* porque são invariavelmente mais baratos e menos arriscados que itens desenvolvíveis. Estes dispositivos também podem ser nomeados como comódites devido ao seu baixo valor agregado.

e uma receptora, o receptor seria compatível com ambos o sistema MIMO e cooperativo. Para o receptor não interessa se a transmissão é 2x1 (MISO Alamouti) ou 1x1x1(Sistema *relay* com Alamouti Distribuído) e isso demonstra que a transição entre sistemas é transparente. Finalmente, a avaliação de desempenho, conforme ilustrado pelo gráfico da Fig. 6, mostra claramente o benefício de se utilizar *relays amplify and forward*, demonstrando uma melhora de aproximadamente 8dB para a mesma *Bit Error Rate* (BER).

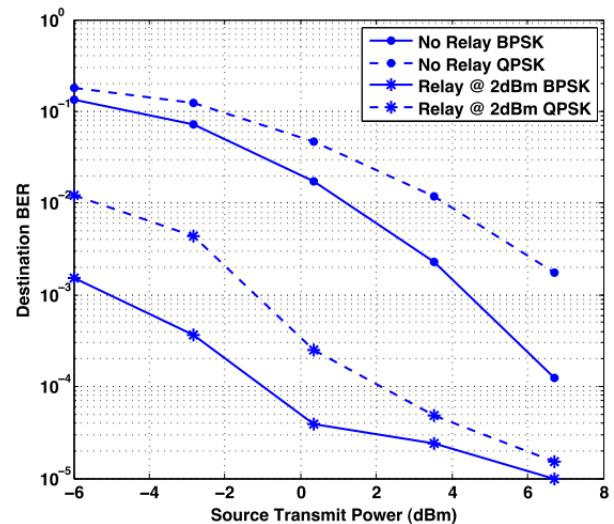


Fig. 6. Resultado da BER para *relay* Alamouti[17]

Algum tempo depois outros pesquisadores decidiram demonstrar como esses ganhos se manifestam em aplicações multimídia. A referência [18] descreve dois tipos de *testbeds* programáveis para comunicação cooperativa construídos no Instituto Politécnico da Universidade de Nova York (NYU). O primeiro tipo é baseado em drivers *open-source*(*Off-the-shelf*) e o segundo é construído utilizando sistemas SDR. É notável que nesta época as ideias de empregar hardware e software livre estavam se tornando cada vez mais consolidadas. Desta forma, a oportunidade de construir uma plataforma *open-source* foi aplicada aos *testbeds* e possibilitaram a implementação de protocolos para redes cooperativas em ambas as camadas físicas e MAC. Neste estudo foi possível obter resultados significativos em termos de throughput, atraso e qualidade de vídeo. A Fig. 7 mostra que o sistema de cooperação impede o surgimento de artefatos no vídeo garantindo uma maior confiabilidade na difusão do sinal.

Outra aplicação interessante explora a aplicação de um protocolo da camada física novo e totalmente distribuído destinado para sistemas de acesso aleatório[19]. Neste trabalho os nós de comunicação possuem somente uma antena, mas o desempenho do tipo MIMO é alcançado. Este protocolo funciona em momentos oportunos em que a cooperação pode realmente ajudar. Denominado de cooperação sob-demanda distribuída, este opera quando a SNR é baixa e, caso contrário, se torna um *Carrier sense multiple access with collision avoidance*(CSMA/CA). Neste trabalho, os pesquisadores também apontam para características típicas de implementações as quais não são possíveis de serem previstas diretamente por

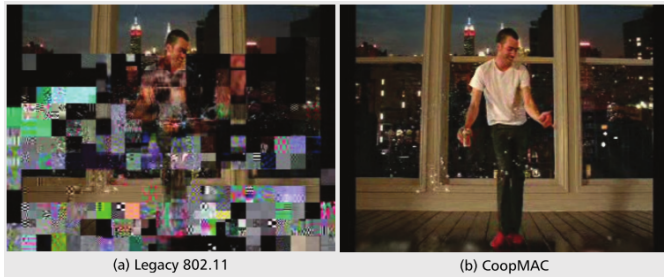


Fig. 7. Melhoria visual da qualidade do vídeo devido ao sistema cooperativo [18]

simulação ou estudos teóricos. Dentre estas degradações estão as imperfeições no sincronismo e coordenação do sistema. A conclusão do trabalho demonstra, a partir da realização de experimentos extensivos, uma melhora substancial no throughput ponto-a-ponto em relação àquele mesmo enlace não cooperativo.

O uso de implementações em sistemas *Software Defined Radio*, o emprego de aplicações *open-source* e o suporte de *testbed's* tem sido muito importantes e aparecem com frequência nos trabalhos mais recentes. Desta forma, os trabalhos de pesquisa estão apresentando construções cada vez mais complexas que exploram de maneiras diversas os ganhos existentes no uso de cooperação e múltiplas antenas. Por exemplo, na referência [20], apresenta-se um esquema de transmissão cooperativa onde um conjunto de nós se organiza em uma *Virtual Antenna Array*(VAA) e foca sua transmissão em direção a um dado receptor, alcançando potenciais melhorias na eficiência energética. Neste caso, o maior desafio enfrentado neste trabalho, e também por muitos outros pesquisadores que também utilizam *testbeds*, é a sincronização precisa dos sinais de rádio frequência dos nós de cooperação. A demonstração deste sistema de transmissão cooperativo consiste de três transmissores cooperando no envio de sinais que se somam construtivamente no receptor. Ao final, demonstra-se que houve o ganho de potência esperado quando se usa o *beamforming* com três nós.

#### REFERENCES

- [1] M. Dohler, *Cooperative Communications Hardware, Channel & PHY*.
- [2] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," pp. 74–80, 2004.
- [3] M. Dohler, D. E. Meddour, S. M. Senouci, and A. Saadani, "Cooperation in 4G - Hype or Ripe?" pp. 13–17, 2008.
- [4] J. Parikh and A. Basu, "LTE Advanced : The 4G Mobile Broadband Technology," *International Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 17–21, 2011.
- [5] D. Lee, H. Seo, B. Clerckx, E. Hardouin, D. Mazzarese, S. Nagata, and K. Sayana, "Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. February, pp. 148–155, 2012.
- [6] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology [Invited Paper]," *Ieee Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 10–22, 2010. [Online]. Available: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=5490974](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5490974)
- [7] A. S. A. Ghafar, N. Satiman, N. Faisal, S. M. M. Maharum, F. A. Saparudin, and R. A. Rashid, "Relay Architectures for LTE-Advanced Network."
- [8] 3GPP, "Further Advancements for E-UTRA: Physical Layer Aspects," p. TR 36.814, 2009. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36814.htm>
- [9] Y. Y. Y. Yang, H. H. H. Hu, J. X. J. Xu, and G. M. G. Mao, "Relay technologies for WiMax and LTE-advanced mobile systems," pp. 100–105, 2009.
- [10] S. Sun, Q. Gao, Y. Peng, Y. Wang, and L. Song, "Interference management through CoMP in 3GPP LTE-advanced networks," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 20, no. 1, pp. 59–66, 2013.
- [11] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Coordinated Multi-Point Operation for LTE Physical Layer Aspects (Release 11)." [Online]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200/\\_136299/136201/11.01.00/\\_60/ts/\\_136201v110100p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200/_136299/136201/11.01.00/_60/ts/_136201v110100p.pdf)
- [12] Q. Li, R. Hu, Y. Qian, and G. Wu, "COOPERATIVE COMMUNICATIONS FOR WIRELESS NETWORKS: TECHNIQUES AND APPLICATIONS IN LTE-ADVANCED SYSTEMS," *Ieee Wireless Communications*, vol. 19, no. April, pp. 22–29, 2012.
- [13] T. Korakis, Z. Tao, S. Makda, and B. Gitelman, "It Is Better to Give Than to Receive - Implications of Cooperation in a Real Environment," pp. 427–438, 2007.
- [14] Rice, "Rice University WARP Project." [Online]. Available: <http://rice.warp.edu>
- [15] Ettus, "Universal Software Radio Peripheral (USRP)." [Online]. Available: <http://www.ettus.com/>
- [16] A. B. A. Bletsas and A. L. A. Lippman, "Implementing cooperative diversity antenna arrays with commodity hardware," pp. 33–40, 2006.
- [17] P. Murphy, A. Sabharwal, and B. Aazhang, "On Building a Cooperative Communication System: Testbed Implementation and First Results," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, no. 1, p. 972739, 2009.
- [18] T. Korakis and M. Knox, "Cooperative network implementation using open-source platforms," *Communications ...*, no. February, pp. 134–141, 2009.
- [19] C. Hunter, P. Murphy, and A. Sabharwal, "Real-time testbed implementation of a distributed cooperative MAC and PHY," *2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1–6, Mar. 2010.
- [20] U. Madhow, S. Barbara, M. Mahboob, U. Rahman, and R. Mudumbai, "Demonstrating distributed transmit beamforming with software-defined radios," pp. 2–4, 2012.