http://dx.doi.org/10.7840/kics.2014.39A.7.389

3GPP LTE-A에서의 진화된 간섭 제거 수신기

황 진 엽◆, 이 상 욱°

Advanced Receiver for Interference Cancellation in 3GPP LTE-A

Jin-Yup Hwang◆, Sang-Wook Lee°

요 약

본 논문은 3GPP Rel-12 표준에서 진행되고 있는 간섭 제거 수신기에 대한 동향과 연구이다. 최근 급증하는 무선 데이터 트래픽 요구에 대응하기 위해 단말 수신기 측면에서는 가장 문제가 되는 셀 간 간섭을 제어할 수 있는 수신기가 필요하다. 이를 위해 근본적인 간섭의 원인인 인접 셀의 데이터 및 제어 신호를 직접 제거하여 수신기의 SINR을 향상시켜 수신 성능을 올리는 네트워크 보조 간섭 제거 (NAICS) 수신기가 표준에서 논의 되고 있다. 본 논문에서는 현재 3GPP 표준에서 논의하는 네트워크 보조 간섭 제거 수신기에 대한 개념 및 동작, 그리고 고려되고 있는 수신기의 기본 성능을 파악하고, 이를 바탕으로 향후 표준에서 진행될 수 수신기의 진화 방향에 대해 살펴본다.

Key Words : Advanced Receiver, NAICS, 3GPP Standard, Blind Detection, Data Cancellation

ABSTRACT

This paper focuses on advanced receiver for interference suppression or cancellation from neighbor cells in the 3GPP Rel-12 standard. From UE (User Equipment) perspective, the advanced receiver which can manage inter-cell interference of adjacent cell is required to support and manage fast-growing wireless data traffic. In 3GPP standard, NAICS which is one of approaches to improve SINR and receiver performance by directly suppression or cancellation of data (PDSCH) and control (PDCCH) signal from interference cells is discussed. In this paper, we briefly introduce the concept and candidate receivers for NAICS (Network Assisted Interference Cancellation and Suppression) based on 3GPP Rel-12 standard, and simulation results for basic NAICS receiver performance are provided.

Ⅰ. 서 론

3세대 이동통신부터 본격적으로 도입된 무선 인터넷 서비스 이후, 최근 스마트폰의 보급은 무선 인터넷 및 다양한 무선 컨텐츠를 WiFi등을 이용한 저렴한 가격에 쉽게 사용할 수 있게 되면서 2010년도부터 2015년까지 약 26배 이상의 무선 데이터 트래픽이 폭증하게 될 것이라고 보고 있다[1]. 이러한 무선 데이터 트래픽 요구를 충족시키기 위해 물리적인 전송 안테나 수의 증가를 이용한 Massive MIMO 기술과 주파수 스펙트럼을 추가적으로 할당하여 대역폭을 증가시키는 대역폭 집성 기술(Carrier Aggregation, CA), 그리고 셀의 사이즈를 줄여 많은 소형 셀(small cell)을 배치하는 방법 등이 고려되고 있다. 이러한 방법 중 특히 소형 셀의 경우, 그 수가 증가함에 따라 인접 셀에서의 간섭 문제가 부각되고, 3GPP Rel-11에서는 이러한

◆ First Author : LG Electronics, jinyup.hwang@lge.com, 정회원
° Corresponding Author : LG Electronics, sangwook1.lee@lge.com, 정회원
논문번호 : KICS2014-05-172, Received May 7, 2014; Revised July 8, 2014; Accepted July 8, 2014

간섭을 줄이고 네트워크 용량을 증가시키기 위해 네트워크 협력을 이용한 FeICIC (Further enhanced inter-cell interference coordination)와 CoMP (Coordinated Multipoint Transmission /Reception)와 같은 기술을 제공하였다[2]. FeICIC 는 간섭을 주는 Macro 셀에서 정해진 서브프레임에서 데이터를 할당하지 않고 소형 셀로 단말(User Equipment, UE)을 오프로딩을 하여 소형 셀에서 데이터 전송을 받게 하여 전체 셀 용량을 증가시키는 방법이다. CoMP 는 Macro 셀과 소형 셀 간의 협력을 통해 셀 경계 UE에게 채널 환경이 좋은 셀로부터 데이터를 전송하거나 간섭이 없는 환경을 만들어주는 DPS (Dynamic point selection)나 DPB (Dynamic point blanking)의 방법을 사용하여 셀 용량을 증가시킨다. 하지만 이러한 기법은 근본적인 간섭을 제거하기보다는 네트워크에서 간섭을 회피시켜주는 방법이다. 3GPP RAN(Radio Access Network)에서는 보다 근본적으로 간섭을 제거하기 위해 셀 내 혹은 셀 간 간섭을 직접 제어 또는 제거할 수 있는 수신기 관련 표준을 정의하여 시스템 용량의 증가를 도모하고 있다. 지금까지 3GPP 표준, 특히 수신기 성능에 관한 표준화 단체인 WG4 (Working Group 4)에서 정의된 간섭 제거 관련 수신기는 크게 3가지로 볼 수 있다. 첫째는, UMTS HSDPA에서 선형 등화기(linear equalizer)를 통해 셀 간 간섭을 제거할 수 있는 Type 3i IRC (Interference Rejection Combining) 수신기가 있다[3]. 두 번째로, UMTS에서의 CDMA용 간섭 제어 수신기를 LTE에서 OFDM-MIMO 수신기에 확장 적용하여, 거의 동일한 개념을 적용한 IRC 수신기가 있다[4]. 그리고 비선형 IC (Interference Cancellation) 수신기로서, 간섭 셀의 동기신호 (Synchronization signal), 방송채널 (Broadcasting channel) 및 RS (Reference signal)를 제거하는 수신기이다. 이와 같은 단말 수신기 진화의 연장선에서 3GPP Rel-12에서는 NAICS (Network Assistance Interference Cancellation and Suppression) 수신기인 간섭 셀의 데이터 및 제어 신호를 제거할 수 있는 수신기를 표준화하기 위해 준비하고 있다[5].

본 논문에서는 3GPP Rel-12 SI (Study Item)에서 진행된 내용을 기반으로 NAICS 수신기의 개념 및 고려되고 있는 수신기와 기본 성능에 대해 살펴보고 향후 Rel-12 WI (Work Item)에서 진행될 NAICS 수신기 방향에 대해 기술한다.

Ⅱ. 3GPP Rel-11 간섭제거 수신기

3GPP WG4에서 WI으로 진행했던 advanced receiver인 LMMSE-IRC수신기는 LTE 시스템에서 셀 경계 단말의 인접 셀 간섭 제어를 목적으로 2개의 수신 안테나를 이용한 수신 빔 포밍에 의해 수신 SINR을 최대화함으로써 간섭 제어를 수행한다[3,6].

이를 수학적으로 모델링 해 보면, N_{cell}개의 다중 셀 환경에서 k번째 subcarrier와 l번째 OFDM 심볼에서 수신한 신호 $y(k,l)$은

$$y(k,l)=\sum_{i=0}^{N_{cell}-1} H_i(k,l)\,W_{Tx,i}(k,l)s_i(k,l)+n(k,l) \tag{1}$$

이다. $H_i(k,l)$는 i번째 셀과 수신단말 사이의 채널행렬이고 $W_{Tx,i}(k,l)$는 i번째 셀의 프리코딩 행렬이다. $s_i(k,l)$와 $n(k,l)$는 i번째 셀의 전송 신호와 분산 을 가지는 가우시안 잡음을 나타낸다. i가 0인 경우, 즉 0번째 셀은 서빙 셀이라고 가정한다. $s_0(k,l)$는 MMSE 등화기 구조의 수신기를 가정했을 때, 수신 신호 y와 등화기 계수로 구성된 weight matrix $W_{Rx,0}(k,l)$의 곱에 의해 구해진다.

$$\hat{s}_{0(k,l)}=W_{Rx,0}(k,l)y(k,l) \tag{2}$$

여기서 등화기 계수는 MMSE criterion에 의해 식 (3)과 같다.

$$W_{Rx,0}(k,l)=P_0\widetilde{G}_0^H(k,l)\overline{R}_{yy}^{-1} \tag{3}$$

여기서, $\widetilde{G}_0(k,l)=\widetilde{H}_0(k,l)\,W_{Tx,0}$이고 $\widetilde{H}_0(k,l)$은 추정된 채널 행렬이다. P_0는 서빙 셀의 전송 전력이고 $\overline{R}_{yy}$는 수신 신호의 공분산 행렬 (covariance matrix)이고 아래와 같이 수신신호의 평균으로 계산된다.

$$\begin{aligned}\overline{R_{yy}}&=E\left[y(k,l)y^H(k,l)\right]\\&=P_0\widetilde{G}_0(k,l)\widetilde{G}_0^H(k,l)+R_{I+N}\end{aligned} \tag{4}$$

R_{I+N}는 간섭과 잡음에 의한 오차 공분산 행렬이고 $E\left[\tilde{y}(k,l)\tilde{y}^H(k,l)\right]$에 의해 얻어진다. $\tilde{y}(k,l)$는 수신신호에서 원하는 서빙 셀 신호를 제외한 오차신호로써

식 (5)와 같다.

$$\tilde{y}(k,l) = y(k,l) - P_0 \tilde{G}_0^H(k,l)s(k,l) \quad (5)$$

여기서 $s(k,l)$는 UE가 알고 있는 k번째 subcarrier와 l번째 RS의 신호를 사용할 수 있다.

또 다른 Rel-11의 advanced receiver로는 비선형 IC (Interference Cancellation) 수신기로, Rel-11 FeICIC WI에서 표준화 되었다. 이 수신기는 상위로부터 Cell ID, CRS AP (Antenna port), MBSFN configuration 등의 정보가 포함된 'CRS-AssistanceInfo-r11'라는 이름의 RRC(Radio Resource Control) 신호를 수신하여, 강한 간섭 신호 환경에서 간섭 셀의 동기신호, 방송채널 및 CRS (Cell-specific reference signal)를 제거한다. 이는 간섭 셀의 CRS를 제거하여 채널 추정 성능을 향상시키거나 서빙 신호의 데이터 영역에 영향을 주는 간섭 셀의 CRS를 제거하여 수신 성능을 향상시키게 된다. CRS-IC 는 Rel-11 FeICIC환경 하에서 반드시 구현되어야 하는 수신 기능이다.

Ⅲ. 3GPP Rel-12 간섭제거 수신기

상기 언급한 Rel-11의 간섭제거 수신기에서는 통계적인 방법으로 간섭을 회피하거나 파일럿에 해당하는 RS (Reference Signal) 의 간섭만을 제거하는 방식으로서, 인접 셀 데이터 등에 의한 간섭으로 인한 성능 열화를 방지하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라 3GPP에서는 간섭 셀의 파일럿인 RS 뿐만 아니라 데이터까지 제거하는 수신기를 도입하기 위해 SI (Study Item)을 진행하였다[7]. 이는 NAICS 로 명명하였으며 2013년 3월 3GPP RAN 59차 총회에서 승인하여 2014년 3월까지 연구를 진행하였다. NAICS 수신기는 기존의 RS IC 혹은 IRC 수신기에 추가적으로 간섭원의 데이터 채널 및 제어 채널에 대한 간섭제거 요구를 표준화 진행에 반영한 것으로, 셀 내 혹은 셀 간의 데이터 및 제어 채널에 의한 간섭 신호를 제거하기 위해서 네트워크를 통해 전송되는 간섭 신호 정보를 이용한다. 예를 들어, 그림 1과 그림 2에서 보듯이, UE1의 수신에 셀 간 간섭원인 UE2의 신호가 섞여서 수신될 경우, UE1 수신 부에서 UE2 간섭신호를 기지국 간의 신호 전달 경로인 backhaul로 전송되는 네트워크 보조 정보(network assisted information)를 이용해서 원하는 수신신호 검출 전에 제거해 줌으로써

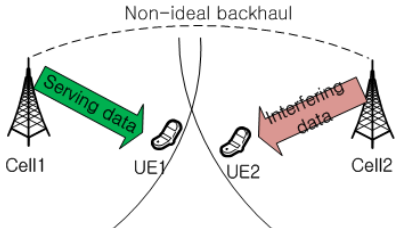

그림 1. NAICS 간섭 환경 시나리오
Fig. 1. NAICS deployment scenario

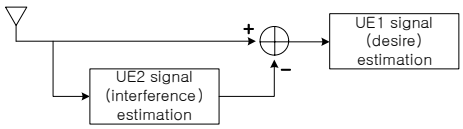

그림 2. NAICS 수신기 개념도
Fig. 2. Concept of NAICS receiver

SIR이 향상된 UE1신호를 효과적으로 수신할 수 있고, 결과적으로 셀 내 혹은 셀 간 경계 영역에서 수신율을 향상시킬 수 있다.

3.1 간섭 신호 정보

네트워크에서 알려주는 간섭 신호의 정보는 인접 셀의 UE에 할당되는 스케줄링 정보나 하향링크 제어 정보(Downlink Control Information, DCI)를 의미한다. 그림 1과 같이 간섭 신호 정보는 backhaul망을 통해 기지국인 eNodeB들 간에 공유가 되며, 간섭 기지국의 공유된 스케줄링 정보와 하향링크 제어 정보는 서빙 기지국에서 해당 UE에게 RRC 신호 전달을 통해 전송된다. 하지만 간섭 신호의 모든 정보가 네트워크로부터 전달될 경우 과도한 네트워크 오버헤드 (overhead) 증가와 backhaul 지연으로 인한 간섭 정보의 시간적 불일치의 문제점이 발생한다. 이를 고려하여 현재 표준화에서는 일부 정보에 대해서는 UE가 직접 간섭 신호 정보를 검출 (blind detection)하여 사용할 수 있는 방법도 연구하고 있다. Blind detection 이란, 그림 3과 같이 서빙 셀의 UE가 할당된 리소스에 인접 셀의 간섭 데이터가 들어올 경우 네트워크의 간

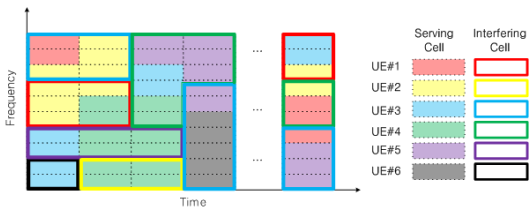

그림 3. 서빙 셀과 간섭 셀의 자원 할당 예
Fig. 3. Scheduling RB of serving an interfering cells

섭 신호 정보 없이 간섭 신호의 특성을 이용하여 간섭 데이터에 사용된 스케줄링 정보나 하향링크 제어 정보를 검출하는 것이다.

NAICS 수신기를 위해서 논의되고 있는 간섭 셀의 정보는 표 1과 같다. 표 1에서 보듯이 필요한 간섭 신호의 정보는 반정적 인자(semi-static parameter)와 동적 인자(dynamic parameters) 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 반정적 인자는 셀에 국한된(cell specific) 정보 또는 셀에서 한번 할당되면 자주 변경되지 않는 정보이고 동적 인자는 단말에 국한된(UE specific) 정보 또는 UE의 채널 환경에 따라 서브프레임 마다 수시로 변경될 수 있는 정보들을 의미한다. 이와 관련하여 현재 표준에서 중요하게 논의 되고 있는 부분이 네트워크 시그널링 인자와 단말 검출 인자 (blind detection parameter)를 구분하는 작업이다. 일반적으로 반정적 인자는 네트워크 시그널링으로 동적 인자는 blind detection parameter으로 나누고 있다. 하지만 UE의 단말 검출 인자에 대한 검출 성능에 따라 수신기 성능 열화를 가져올 수 있고 수신기의 복잡도 크게 증가하는 문제점이 있다. 이로 인해 일부 동적 인자에 대해서는 네트워크간 협조를 통해 각 parameter에 할당될 수 있는 후보군을 제한시키는 방법도 고려할 수 있다. 예를 들어 Virtual Cell ID의 경우 총 504개의 후보군이 있으며 이를 UE가 blind detection하기 위해 504개 후보군에 대해 모두 비교를 할 경우 수신기의 복잡도 크게 증가하기 때문에 네트워크간 협조를 통해 504개의 Virtual Cell ID 중 일 부분만 사용하도록 제한할 수 있다.

상기 간섭 신호 정보들은 3가지 타입으로 분류될 수 있다. Type1은 간섭 셀의 채널 추정을 위한 정보이고, Type2는 간섭 신호의 심볼을 검출하기 위해 필요한 정보이고, Type3은 간섭 신호의 데이터를 디코딩하기 위해 필요한 정보이다. 이러한 정보는 수신기의 구조에 따라 요구되는 간섭 신호의 정보가 달라질 수 있다.

표 1. 요구되는 간섭 정보 신호
Table. 1. Required network assisted information

	Parameters	Type
Dynamic	TM (Transmission mode), RI, PMI, PDSCH allocation, Data to RS EPRE(PA), DMRS APs, nSCID, CFI, Virtual cell ID	Type1
	Modulation Order	Type2
	MCS, RNTI	Type3
Semistatic	CRS AP, Cell ID, Data to RS EPRE(PB), System bandwidth, MBSFN configuration	Type1
	CSI-RS presence and pattern	Others

3.2 NAICS 수신기 구조

현재 표준에서 논의되는 NAICS 수신기 후보군은 간섭을 제어하는 IRC계열의 E-LMMSE-IRC (Enhanced LMMSE IRC)와 간섭을 제거하는 IC계열의 SLIC (Symbol level IC)와 CWIC (Codeword level IC), 그리고 ML계열의 R-ML (Reduced ML) 등 크게 3 종류이다.

E-LMMSE-IRC 수신기는 MMSE-IRC의 진화된 형태로써 아래의 수식에서 보듯이, Rel-11에서 사용한 MMSE-IRC 수신기의 부정확한 간섭과 잡음에 대한 공분산 행렬 추정을 간섭 셀의 채널 추정 정보를 추가함으로써 향상된 정확도의 공분산 행렬 추정을 시도하는 개념이다. 수신 신호의 공분산 행렬 $\overline{R_{yy}}$는 간섭 셀의 채널 추정 값 $\widetilde{G}_1$,을 이용하여

$$\overline{R_{yy}} = P_0 \widetilde{G}_0(k,l)\,\widetilde{G}_0^H(k,l) + P_1 \widetilde{G}_1(k,l)\,\widetilde{G}_1^H(k,l) + R_{I+N} \tag{6}$$

표현될 수 있고, 간섭과 잡음에 대한 오차 공분산 행렬 R_{I+N}, 는

$$R_{I+N} = E\left[\tilde{y}(k,l)\tilde{y}^H(k,l)\right] \tag{7}$$

$$\tilde{y}(k,l) = y(k,l) - P_0\widetilde{G}_0^H(k,l) - P_1\widetilde{G}_1^H(k,l) \tag{8}$$

와 같이 근사적으로 얻어질 수 있다. 즉, 수신 신호에서 서빙 셀과 가장 큰 간섭을 주는 셀의 간섭을 제거하여 간섭과 잡음에 대한 오차 공분산 행렬의 정확도를 향상시킴으로써 수신기 성능을 향상시키는 방법이다. E-LMMSE-IRC 수신기에서 필요한 간섭 셀의 정보는 간섭 셀 채널을 추정하기 위해 Type1의 간섭 신호 정보만 필요하게 된다. 따라서 고려되는 NAICS 수신기 중 수신기 복잡도가 가장 낮고 필요한 간섭 신호의 정보가 적은 장점이 있지만 다른 수신기에 비해 간섭제거 성능이 제한적이라는 단점이 있다.

IC계열의 수신기는 디코더 입력단의 소프트 심볼 레벨 간섭신호를 제거하는 SLIC 수신기와 디코더 출

력단의 비트 레벨 간섭신호를 제거하는 CWIC 수신기 두 가지로 나눌 수 있다. 그림 4는 SLIC 수신기의 예로써, 간섭 데이터 신호를 심볼레벨($\tilde{s}_1$)로 검출한 후 추정된 간섭 채널을 이용하여 간섭 신호를 재생성 한다. 이를 이용하여 수신한 신호에서 재생성된 간섭 신호를 제거하면 식 (9)와 같이 간섭이 제거된 수신신호를 얻을 수 있다.

$$\tilde{y} = y - P_1 \tilde{G}_1 \tilde{s}_1 \tag{9}$$

간섭 제거로 인해 향상된 SIR을 가진 신호 에 대해 서빙 신호를 아래와 같이 검출할 수 있다.

$$\tilde{s}_0 = W_{Rx,0} \tilde{y} \tag{10}$$

간섭 신호를 심볼레벨로 검출하기 위해서는 간섭 신호의 Type1과 Tpye2의 정보가 요구된다.

CWIC 수신기의 기본 동작은 SLIC 수신기와 유사하지만 디코더 출력 신호를 얻기 위해 간섭 신호의 디코딩에 필요한 MCS (Modulation and Coding Scheme)와 RNTI (Radio Network Temporary Identifier)정보인 Type3 정보가 추가적으로 필요하고 디코딩 과정까지 포함되어 SLIC 수신기보다 높은 수신기 복잡도가 요구되지만 더 많은 성능 이득을 가져올 수 있다.

ML계열의 R-ML 수신기는 기존에 잘 알려진 ML 수신기 대비 복잡도를 낮추기 위해 Sphere decoding이나 QRD-M과 같은 방식을 사용할 수 있다[9,10]. R-ML 수신기는 이미 셀 내의 UE간 간섭을 제거하여 성능을 향상시키는 방법으로 많은 연구가 이루어져있다. 따라서 R-ML은 셀 내의 환경을 셀 간 간섭환경으로 확장하여 서빙 신호와 간섭 신호를 같이 고려해 기존 ML 수신기 과정을 수행하여 간섭 신호를 제거할 수 있다. R-ML수신기를 통해 간섭 신호를 제거하기 위해서는 SLIC 수신기와 같은 간섭 신호의 정보가 필요하다. 하지만 간섭 신호의 layer수나 modulation order가 증가할 경우 수신기 복잡도가 증가할 수 있다.

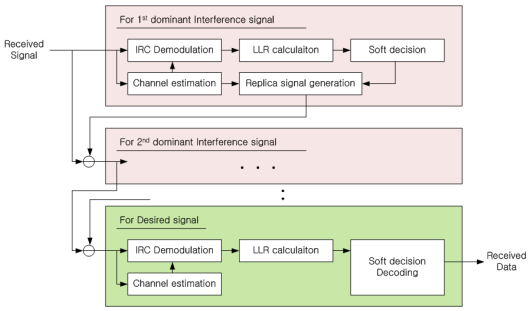

그림 4. SLIC 수신기 구조 예
Fig. 4. Example of SLIC receiver structure

Ⅳ. 모의실험 결과

3GPP WG1과 WG4에서는 그림 5와 같이 세 가지의 NAICS 시나리오를 고려하고 있다. 첫 번째로는 non-ideal backhaul기반의 Homogeneous network으로 Macro셀의 intra-site에서는 정보 교환은 가능하지만 inter-site에서의 정보 교환은 backhaul 지연의 영향을 받는 환경이다. 두 번째 non-ideal backhaul의 heterogeneous network은 Macro 셀과 소형 셀 또는 Pico 셀과 같은 핫스팟 셀 환경에서 homogeneous network과 같이 정보 교환에 있어 non-ideal backhaul 지연에 대한 영향을 받는다. 세 번째 시나리오는 ideal backhaul의 heterogeneous network 환경이다. 하나의 Macro 셀에 속한 Macro 셀과 소형 셀간, 소형-소형셀 간은 ideal backhaul로 되어있어 정보교환이 가능하나 Macro-Macro 셀간 또는 서로 다른 Macro 셀에 속한 소형-소형 셀 간은 non-ideal backhaul로 정보 교환이 backhaul 지연에 대해 영향을 받는 환경이다[7].

3GPP WG4에서는 위 세가지 시나리오를 기반으로 하여 시스템 레벨 모의실험(system level simulation)을 통해 UE가 경험하는 간섭의 크기를 측정하여 NAICS 수신기 성능 검증을 위해 사용한다. 시스템

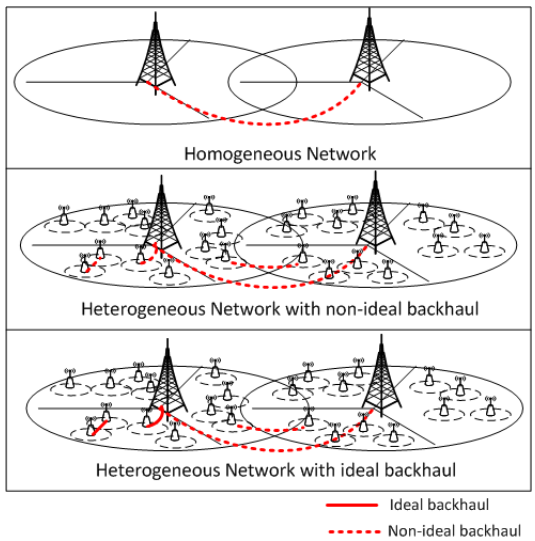

Fig. 5. NAICS scenario
그림 5. NAICS에서 고려되는 시나리오

모의실험 결과에 의해 NAICS 수신기 동작 범위는 SINR이 낮은 셀 경계 UE들에 해당하는 범위이고 고려하는 간섭 셀의 수는 최대 2개이다.

4.1 네트워크 보조 정보 기반 수신기 성능

그림 6과 그림 7은 각 NAICS 수신기별 수율 성능(Throughput performance)을 나타낸 그래프이다. 성능 비교를 위한 기준 수신기(baseline receiver)는 Rel-11에서 정의된 MMSE-IRC수신기이다. 각 수신기의 성능은 모든 간섭 신호에 대한 정보를 알고 있다고 가정하였고 Rel-11에서 고려한 CRS-IC를 포함한 결과이다. 두 개의 간섭 신호 INR (Interference to Noise Ratio)은 각각 13.91dB와 3.34dB이고 서빙 신호의 modulation order는 QPSK이다. 그 외의 모의실험 환경은 표 2와 같다. 그림 6과 그림 7은 각각 간섭 신호의 modulation order가 QPSK, 64QAM에서의

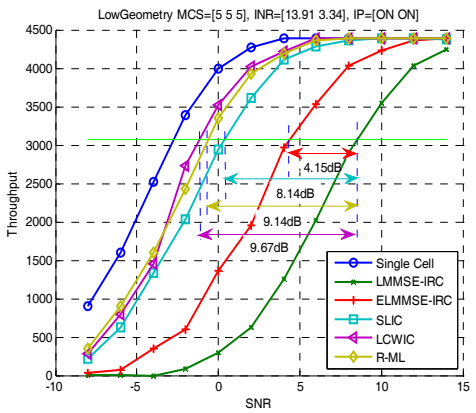

그림 6. 낮은 MCS에서의 수신기 수율 성능
Fig. 6. Throughput performance for low MCS

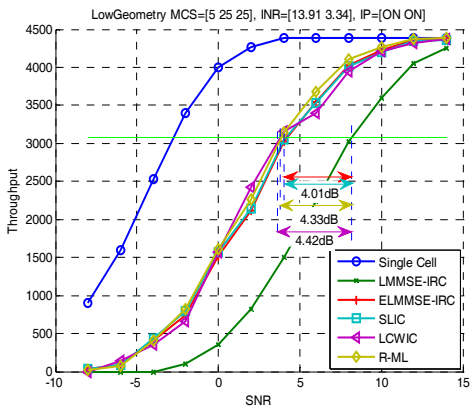

그림 7. 높은 MCS에서의 수신기 수율 성능
Fig. 7. Throughput performance for high MCS

표 2. NAICS 수신기 성능 검증을 위한 모의 실험 환경
Table 2. Simulation assumption for various NAICS receiver performance evaluation

Common Parameters		Unit	Serving	I1	I2
Downlink power allocation	ρ_A	dB	-3	-3	-3
	ρ_B	dB	-3	-3	-3
$BW_{Channel}$		MHz	10	10	10
Cell Id			0	6	1
E/Noc		dB	sweep	13.91	3.34
MCS			5	5	5
				25	25
Rank			1	1	1
Transmission mode			4	4	4
PDSCH Allocation		PRB	50	50	50
Number of control OFDM symbols			2	2	2

Note1: no timing and frequency offset

NAICS 수신 성능을 보여준다. 각 수신기별 성능 이득은 표 3에 정리되어 있다. 성능 이득은 표준에서 정의하는 이론적 최대 수율의 70%지점에서의 SNR 값에서의 수신기별 SNR 이득을 의미한다.

간섭 신호의 modulation order가 QPSK로 낮을 경우 NAICS 수신기의 성능이 CWIC > R-ML > SLIC > ELMMSE-IRC 수신기의 순서로 좋은 성능 이득을 보인다. 앞서 언급한 데로, 간섭 신호의 검출을 디코딩까지 고려한 CWIC 수신기가 가장 좋은 성능을 보였고 간섭 신호를 회피하는 ELMMSE-IRC 수신기가 가장 낮은 성능 이득을 보인다. 하지만 간섭 신호의 modulation order가 높을 경우에는 SLIC, CWIC, R-ML 수신기는 기본 MMSE-IRC수신기 보다는 성능 이득이 있으나 modulation order가 낮을 경우에 비해 성능 이득이 감소함을 볼 수 있다. 이에 반해, ELMMSE-IRC 수신기는 간섭 신호의 검출을 통한 제거과정이 없이 간섭 채널 추정을 통한 간섭 제어이기 때문에 전체적으로 낮은 성능 이득을 보이나 간섭 신호의 환경과 상관없는 일정한 수신 성능 이득을 보여준다. 고려되고 있는 후보 NAICS 수신기는 간섭 신

표 3. 70% 수율에서의 SNR(dB) 이득
Table 3. SNR gain (dB) at 70% throughput

Modulation order (간섭신호)	ELMMSE-IRC	SLIC	CWIC	R-ML
QPSK	4.15	8.14	9.67	9.14
64QAM	4.01	4.01	4.42	4.33

호의 INR의 크기와 modulation order에 따라 성능 이득의 차이는 있지만 모두 기준 수신기인 MMSE-IRC 수신기 대비 일정 이상의 성능 이득을 보여 주고 있음을 알 수 있다.

4.2 Blind detection 기반 수신기 성능

상기 결과에서 보듯이 NAICS 수신기는 Rel-11에서 사용하는 MMSE-IRC 수신기 대비 성능 이득을 가져온다. 하지만 Ⅲ절에서 논의한 바와 같이 모든 정보를 네트워크에서 전송하기에는 여러가지 어려움이 있으며 이에 따라 단말단에서의 blind detection이 필요하다. 이러한 이유로 간섭 신호에 대한 정보를 UE가 blind detection을 할 경우 detection 오류로 인한 간섭 제거 성능이 열화 가능성이 존재하며, 이로 인한 전체적인 성능 이득이 낮아질 수 있다.

우선 간섭 데이터 신호를 제거하는 수신기 동작의 실행 가능성(feasibility)을 위해 동기 네트워크(synchronous network) 즉, 서빙 셀과 간섭 셀간의 CP (Cyclic Prefix) 길이, 슬롯 및 subframe 타이밍, SFN (System Frame Number) 등이 동기되어 있음을 가정하고 또한 동일한 시스템 대역폭 사용을 가정해야 한다.

동적 인자에 속하는 RI (Rank Indicator), PMI (Precoding Matrix Indicator), Modulation order, PDSCH allocation, Data to RS Power Ratio (PA), DMRS (DemodulationRS) APs, nSCID (ScramblingIdentity)등에 대해서는 네트워크간 backhaul 지연으로 실시간 네트워크 시그널링이 불가능하기 때문에 단말 수신단에서 blind detection을 통해 획득할 필요가 있다. 각 간섭 정보의 blind detection 방법은 수신 신호의 오차 공분산 행렬이나 할당 가능한 후보군에 대해 비교를 통해 얻는 ML 방식 등이 있을 수 있다. 예를 들어, Modulation order에 대한 blind detection 방식은 복잡도를 고려한 ML 방식[11]으로 얻을 수 있다.

$$n = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left(-\frac{1}{\sigma_k^2}|\bar{s}_k - c_{\min}|^2\right) - \ln\pi\overline{\sigma^2}|C_n| + \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\beta_n(\bar{s}_k,\sigma_k) \quad (11)$$

C_n은 modulation order를 나타내는 표현으로 C_1은 QPSK, C_2는 16QAM, C_3는 64QAM을 나타낸다. $c_{\min}$의 정의는 $c_{\min} = \arg_{c\in C_n}|\bar{s}-c|$ 이다. 수식(11)의 마지막 부분의 β함수는 수신신호와 간섭에 대해 참값인 modulation order일 때의 보정 값으로 높은 SNR일 경우 0으로 수렴한다. RI와 PMI정보는 수신 신호의 오차 공분산 행렬을 이용하여 아래의 수식으로 얻을 수 있다.

$$\hat{W}_{Tx,I} = \arg\min_{\hat{W}_{Tx,I}}\left(\| \hat{R}_{Data} - \overline{R}(W_{Tx,I_i}) \|^2\right) \quad (12)$$

$\hat{R}_{Data}$는 수신 신호의 오차 공분산 행렬이고 $\overline{R}(W_{Tx,I_i})$는 서빙 채널, 간섭 채널과 간섭에 대한 공분산 행렬로 아래의 수식과 같다.

$$\overline{R}(W_{Tx,I_i}) = \hat{H}_S W_{Tx,S} W_{Tx,S}^H \hat{H}_S^H + \hat{H}_I W_{Tx,I_i} W_{Tx,I_i}^H \hat{H}_I^H + \hat{R}_R \quad (13)$$

따라서 RI와 RMI의 후보군에 대해 수식(12)를 만족시키는 $W_{Tx,I}$를 선택하면 간섭 셀에 대한 RI와 PMI정보를 얻을 수 있다.

상기 언급된 간섭 정보 외에 간섭 신호의 전송 모드 (Transmission mode)도 서빙 신호와 간섭 신호가 서로 다른 전송 모드일 경우 blind detection에 의한 간섭 제거도 고려될 수 있다. 이러한 모든 동적 인자에 대한 blind detection을 고려할 때 수신기의 복잡도는 크게 증가하게 된다. 또한 각 간섭 신호 정보의 blind detection 오류의 중첩으로 인해 NAICS 수신기 성능 이득은 작아지게 된다. 그림 8 ~ 그림 11은 간섭 신호 정보를 UE가 blind detection을 통해 얻을 경우의 SLIC 수신기와 R-ML 수신기의 수율 성능을 나타낸 그래프이다. UE가 blind detection을 통해 얻은 간

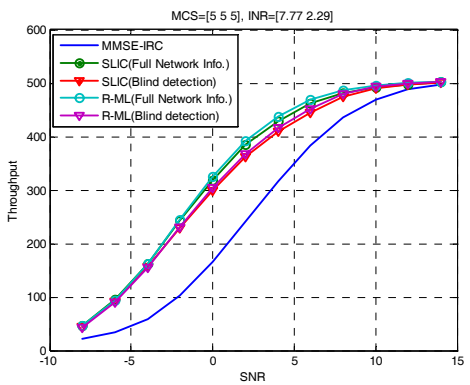

그림 8. 중간 INR에서 MCS=[5 5 5]인 경우 blind detection 수율 성능
Fig. 8. Throughput performance with blind detection under Medium INR (MCS=[5 5 5])

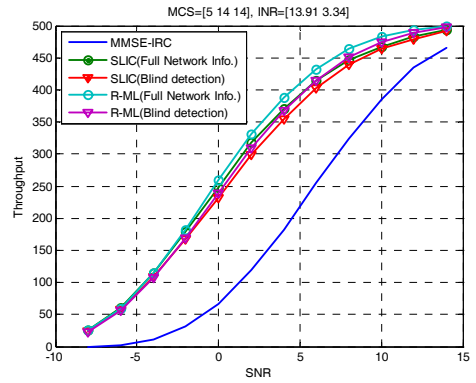

그림 9. 중간 INR에서 MCS=[5 14 14]인 경우 blind detection 수율 성능
Fig. 9. Throughput performance with blind detection under Medium INR (MCS=[5 14 14])

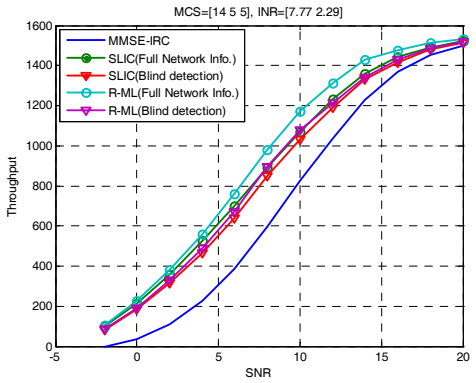

그림 10. 중간 INR에서 MCS=[14 5 5]인 경우 blind detection 수율 성능
Fig. 10. Throughput performance with blind detection under Medium INR (MCS=[14 5 5])

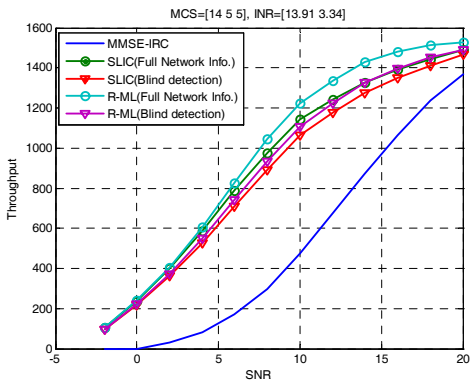

그림 11. 높은 INR에서 MCS=[14 5 5]인 경우 blind detection 수율 성능
Fig. 11. Throughput performance with blind detection under High INR (MCS=[14 5 5])

섭 신호의 동적 인자는 PMI, RI, Modulation order, PDSCH allocation, Data to RS Power Ratio (PA)이다. 전체적인 모의 실험 환경은 표 2를 기반으로 PDSCH allocation은 6RB로 고정했다. 간섭 신호 크기는 표준에서 system level simulation을 통해 정의된 중간 INR의 [I1 : 7.77, I2 : 2.29]dB와 높은 INR의 [I1 : 13.91, I2 : 3.34]dB 두 가지 값을 사용하였다. 서빙셀과 간섭셀 신호의 MCS는 QPSK인 MCS5, 16QAM인 MCS14를 사용하였다. 예를 들어, 그림 9에서 MCS=[5 14 14]의 의미는 서빙셀은 QPSK, 간섭셀은 16QAM modulation order를 사용했다는 것을 나타낸다.

앞서 언급했듯이 동적 인자들에 대한 검출 오류의 누적으로 인해 모든 간섭 신호 정보를 알고 있는 경우에 대비하여 간섭 환경에 따라 약 1~1.5dB 정도의 성능 감소가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 수신기의 복잡도 측면과 성능을 고려하여 반정적 인자에 대해서는 네트워크 시그널링이 필요하다. 앞서 언급했듯이, 동기화 관련 간섭 정보는 네트워크 협조를 통해 얻을 수 있고, 그 외의 간섭 정보인 CRS AP, Cell ID, MBSFN configuration의 정보는 Rel-11 FeICIC에서 정의된 'CRS-AssistanceInfo-r11'의 RRC 시그널링을 재사용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 3GPP Rel-12 Study Item에서 진행한 NAICS 수신기에 대한 개념과 간섭 신호에 대한 정보 및 고려되고 있는 수신기에 대해 알아보았다. NAICS는 간섭 신호에 대한 정보를 이용하여 근본적 간섭인 데이터 신호를 제거 또는 제어하려는 수신기이기 때문에 기준 MMSE-IRC 수신기 대비하여 큰 성능 이득을 기대할 수 있다.

현재 NAICS 표준화 진행은 3GPP RAN #63 Plenary 에서 Work Item 으로 승인이 되었으며, Study Item의 연구결과에 추가적으로 본문에서 언급된 간섭 신호 정보들에 대한 blind detection을 통한 NAICS 수신기 동작의 수행 가능성을 연구하고 있다. 즉, 간섭 신호의 정보를 네트워크 시그널링 정보와 blind detection으로 구분하기 위한 분석이 이루어진다[8]. UE가 blind detection을 통해 간섭 신호의 정보를 얻을 경우 blind detection 오류로 인한 성능 감소와 수신기 복잡도 증가를 가져올 수 있기 때문에, blind detection에 대한 판단은 기준 수신기인 MMSE-IRC 수신기 대비 성능 이득과 blind detection을 통한 수신기 복잡도 등을 고려하여 결정된다.

앞서 모의 실험 결과에서 보듯이 backhaul 지연으로 인해 간섭 셀로부터 간섭 신호에 대한 정보를 얻지 못하는 동적 인자에 대해서는 수신기 복잡도를 고려하여 blind detection을 해야 하지만 반정적 인자에 대해서는 Rel-11에서 사용된 RRC 시그널링의 재사용이나 추가적인 네트워크 시그널링의 도입이 요구된다. 따라서 blind detection에 대한 알고리즘과 성능이 NAICS 수신기에 있어 가장 중요한 이슈가 될 것이다.

NAICS 수신기는 네트워크의 부분적 도움에 의해 수신기가 자체적으로 간섭 신호를 제거 때문에 네트워크에서 간섭을 제어하는 Rel-11에서 논의된 FeICIC나 CoMP 환경에 적용되어 추가적인 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 특히 소형셀 환경이 증가하는 상황에서 셀 경계에서의 근본적인 문제인 간섭에 의한 수신율 저하를 해결함으로써 향후 논의될 다양한 네트워크 환경하에서도 적용되어 UE의 수신 성능 향상을 기대할 수 있다. 또한 추후 인접 셀의 데이터 채널 뿐만 아니라 제어 채널에 대한 간섭 제거 혹은 간섭 제어 수신기에 대한 연구도 계속되어야 할 것이다.

References

[1] Cisco VNI Mobile, 2011.

[2] Y. Yun, “3GPP LTE-A Technology (Trend for REL-10 and Prospect for REL-11) (LTE-Advanced 표준 기술 (REL-10 동향 및 REL-11 전망)),” *KICS Mag.*, vol. 28, no. 6, pp. 61-83, May 2011.

[3] 3GPP TR 25.963, “Feasibility study on interference cancellation for UTRA FDD UE,” v11.0.0, 2012.

[4] 3GPP TR 36.829, “Enhanced performance requirement for LTE UE,” v11.1.0, 2012.

[5] 3GPP TR 36.866, “Network-assisted interference cancellation and suppression for LTE (Release 12),” v12.0.1, 2014.

[6] Y. Ohwatari, N. Miki, T. Asai, T. Abe, and H. Taoka, “Performance of advanced receiver employing interference rejection combining to suppress inter-cell interference in LTE-advanced downlink,” *IEEE VTC Fall*, pp. 1-7, San Francisco, CA, Sept. 2011.

[7] 3GPP RP-130404, “Study on network assisted interference cancellation and suppression for LTE,” 3GPP RAN #59, Feb. 2013.

[8] 3GPP RP-140519, “New work item proposal for network assistance interference cancellation and suppression for LTE,” 3GPP RAN #63, Mar. 2014.

[9] M. Mikami and T. Fujii, “A downlink transmission method for OFDM cellular systems with inter-cell interference cancellation using simplified MLD based on MMSE QRD-M algorithm,” *IEEE VTC Spring*, pp. 2011-2015, Singapore, May 2008.

[10] A. M. Chan and I. Lee, “A new reduced-complexity sphere decoder for multiple antenna systems,” *IEEE ICC*, vol. 1, pp. 460-464, New York, 2002.

[11] D. Bai, J. Lee, S. Kim, and I. Kang, “Near ML modulation classification,” *IEEE VTC Fall*, pp. 1-5, Quebec City, Sept. 2012.

황 진 엽 (Jin-Yup Hwang)

2005년 2월 : 경희대학교 전파통신공학과 졸업

2007년 2월 : 한국정보통신대학원 공학 석사

2012년 2월 : 한국과학기술원 정보통신공학과 박사

2012년 1월~현재 : LG 전자 선임연구원

<관심분야> 3GPP LTE/LTE-A 이동통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템

이 상 욱 (Sang-Wook Lee)

1994년 2월 : 서울대학교 전자공학과

1996년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사

2001년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사

2001년 3월~현재 : LG 전자 수석연구원

<관심분야> 3GPP UMTS/LTE/LTE-A 이동통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템