무선 센서 네트워크를 위한 협력 통신

박세용 | 박세웅
서울대학교

요 약

협력 통신은 링크의 품질을 향상시키기 위한 유력한 대안으로 평가 받고, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본고는 특히 무선 센서네트워크에서 협력 통신이 가질 수 있는 장점들을 설명하고, 이를 위한 현재의 연구의 흐름을 설명한다. 무선 센서 네트워크에서 협력 통신을 통해 얻어진 다이버시티 이득은 주로 전송 전력을 줄이기 위해 사용되는데 이를 효율적으로 활용하기 위한 기법들을 소개한다. 또 앞으로 실제 네트워크에서 적극적으로 사용되기 위해 추가적으로 연구되어야 할 이슈에 대해 살펴본다.

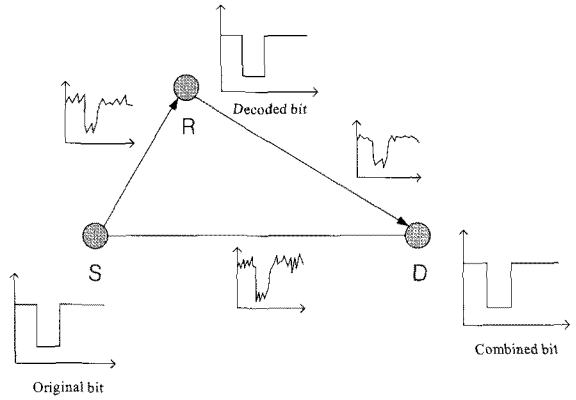
I. 서 론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks)는 건물제어(building Control), 환경관찰(environmental monitoring), 교통통제(traffic control), 제조 및 공장 자동화(manufacturing and plant automation), 감시(surveillance) 등의 분야에서 다양한 방식으로 사용되고 있다. 이와 같은 응용을 위해서 무선 센서 네트워크를 이루는 통신 단말은 배터리를 교체/충전하기 힘들고, 시스템 내의 단말의 수가 매우 많기 때문에 단말의 저전력, 저비용 이라는 조건을 만족시켜야 한다. 이러한 무선 센서 네트워크를 위한 기법들은 지난 수년간 많은 논문들에서 연구되었고, IEEE 802.15.4, ZigBee, ISA100, WirelessHART 등의 표준화로 활발한 상업화가 추진되고 있다.

한편, 무선 통신에서 링크의 처리량를 늘리기 위한 노력은 여러 방법으로 진행되었다. 그 중 가장 대표적인 방법 중에 하나는 확률적으로 독립적인 전달 경로를 통해 Diversity gain을 얻는 것이라고 할 수 있다. 이러한 방법은 주로 MIMO에서 다중 안테나를 이용하는 방법으로 사용되었다. 하지만 단말의 특성상 MIMO는 언제나 선택 가능한 사항이 아니다. 특히 네트워크의 지속 시간을 최대화함과 동시에 간단한 단말을 설계하는 게 가장 중요한 목표인 센서 네트워크에서는 MIMO의 활용이 사실 상 불가능하다. 이러한 한계를 극복하고 MIMO와 유사한 효과를 얻기 위해 제안된 방법이 바로 협력 통신(Cooperative Communication)이다. 협력 통신은 공간적으로 넓게 분포한 노드들의 중복 전송을 통해 diversity gain을 얻는다. (그림 1)은 이와 같은 협력 통신의 과정을 보여준다. 우선 노드 S는 전송하고자 하는 패킷을 브로드캐스트한다. 이때 릴레이 노드 R은 이 패킷을 overhearing하고 노드 D로 전송한다. 노드 D는 S와 R로부터 두번에 걸쳐 동일한 패킷을 전송받게 되고 이 프레임들을 MRC나 FEC 등을 통해 조합하게 된다. 이러한 방식은 무선 링크의 고질적인 문제인 페이딩(fading)을 극복하기 위해 제안되었고 최근 몇 년 동안의 다수의 연구에서 그 성능이 입증되었다. 이러한 공간적 다양성(spatial diversity)를 이용한 협력통신은 향상된 링크 용량(link capacity)과 낮은 재전송률로 인한 더 높은 처리량(throughput), 공간 및 채널 재사용(spatial/channel reuse)에 의한 낮은 간섭효과 등의 장점을 가질 수 있다.

이러한 장점을 무선 센서 네트워크에 적용하기 위한 노력

은 여러 연구에서 수년에 걸쳐 계속되어왔다. 특히 전술한 바 무선 센서 네트워크의 가장 중요한 이슈라고 할 수 있는 전력 소모 혹은 네트워크 지속 시간에 대한 성능을 개선하는 방안으로 연구 되어왔다.

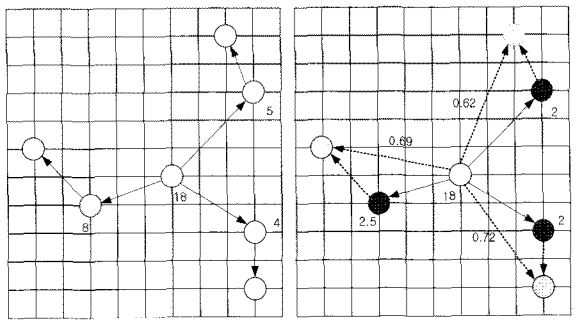


(그림 1) 협력통신(cooperative communication)

II. 본 론

[1]에서는 무선 링크에서의 전송이 자연스럽게 broadcast되는 현상을 이용해 협력 통신의 가장 기본이 될 수 있는 링크를 모델링 하고 이를 Hitch-hiking 이라 명명하였다. 제안된 협력 통신을 위해서 두가지 파라미터를 정의하였다. γ_p는 패킷을 성공적으로 디코드할 수 있는 문턱값(threshold)이다. 수신 노드는 γ_p이상의 SINR을 갖는 신호를 패킷으로 인식하고 payload message를 읽어낼 수 있다.(full reception) γ_{acq}은 패킷의 time acquision을 위한 문턱값이다. 이 값보다 큰 SINR를 가지는 신호에 대해서는 그 payload message를 읽어낼수는 없지만 신호로 인식하고 MRC등 combining scheme에 사용될 수 있다.(partial reception) 이러한 가정에서 Hitch-hiking은 full reception된 신호뿐 아니라 patial reception된 신호도 링크를 구성할 때 활용하는 방법을 제시하고 있다. (그림 2)는 그의 한 예를 설명하고 있다. 단순 전송 방식 에서는 모든 노드에 35의 에너지가 필요한 반면 partial reception을 적극적으로 이용했을 경우에는 24.5의 에너지로 모드 노드에 패킷이 전달될 수있다. 이와같이 브로드 캐스트의 장점을 활용하는 협력 통신은 전송전력을 비교해 보았을 때 좀 더 에너지효율적인 통신이 가능함을 알 수 있고, 또 이는 노드의 밀도가 클 때 그 이득이 더 커진다는 사실에서 센서 네트워크와 같은 환경에서는 더 큰 유용할 수 있음을 시사한다.

[2]에서는 Alamouti diversity를 이용한 MIMO의 에너지 효율성에 대해 논하고 협력 통신 역시 이와 유사한 효과를 가질 수 있음을 이론적 분석 및 시뮬레이션을 통해 보이고 있다. 흥미로운 점은 전송 노드 그룹와 수신 노드 그룹의 거리가 멀수록 협력통신의 이득이 더 커진다는 것을 볼 수 있다는 점이다. 즉, 협력 통신은 채널 상태가 나쁘거나 통신 노드간의 거리가 먼 상황에서 더욱 에너지 효율적으로 동작할 뿐더러, 이는 협력을 위한 패킷 교환이나 딜레이를 고려하더라고 단순 전송 방식보다 더 큰 이득을 가져다 준다고 할 수 있다.



(그림 2) 협력통신으로인한에너지효율적인 Broadcast

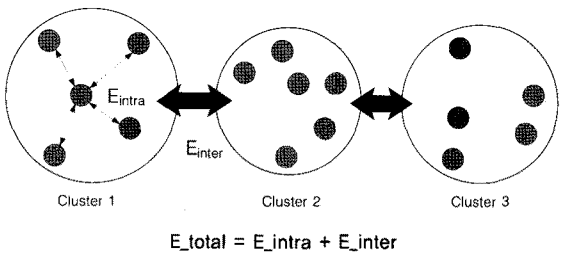
[3]에서는 이러한 협력 통신의 이점을 센서 네트워크에서 활용하기 위한 좀 더 구체적인 방법을 제안하고 있다. MAC-layer에서 RTS-CTS signaling을 기본으로 하는 이 기법은 적은 오버헤드로 릴레이 노드들이 분산적으로 선택되고 협력 통신에 참여한다. 그리고 제안하는 기법을 통해 선택 된 릴레이 노드는 릴레이 후보 노드들 중에서 가장 에너지 효율적으로 동작할 수 있는 최적 노드이다. 이 연구에서는 센서 네트워크에서의 복잡도를 고려해 단일 릴레이만을 상정한 기법을 제안하였음에도 불구하고 한 심볼당 소모하는 전송 에너지를 비교해 보았을때 기존의 일반 통신보다 평균적으

로 3배정도 효율적인 동작을 한다는 사실을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. [3]은 기존의 이론적으로 제시되던 협력 통신의 가능성을 센서 네트워크에서 더 현실적인 프로토콜로 제안했다는 점에서 큰 의미를 가진다고 할 수 있다. 또 [4]에서는 협력 통신을 테스트베드에 구현해냄으로써 실험에서 측정한 BER값이 이론적으로 분석한 값과 일치함을 실험적으로 증명해 내었다.

위에서 살펴 본 바와 같이 협력 통신의 연구의 초기 단계에서는 물리 계층에 그 연구가 집중되었다. 주로 공간적 다양성 를 얻기 위한 이론적 토대들이 마련되었다고 할 수 있다. 하지만 협력 통신은 MIMO와는 달리 한 디바이스 내에서 송수신 과정이 이루어지는 게 아니기 때문에 전송 노드 단(전송 및 릴레이 노드)과 수신 노드 단의 coordination이 굉장히 중요한 이슈이다. 특히 센서 네트워크와 같이 노드의 개수가 많고 각각의 노드에 강한 에너지 제한이 있는 경우에는 좀 더 면밀한 시스템 디자인이 필요하다. 본 장에서는 이와 관련되어 현재 제안되어 있는 센서 네트워크에서의 협력 통신을 크게 세가지로 분류하고 이를 소개하고자 한다.

1. 클러스터 기반 협력 통신

센서 네트워크는 다수의 노드가 넓은 공간 걸쳐 분포되어 있기 때문에 릴레이 노드의 역할을 할 수 있는 후보군이 많다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 극대화하기 위한 방법이 클러스터를 기반으로 하는 협력 통신이다. 동시에 클러스터 기반 협력 통신은 멀티 홉 환경에서 매 홉마다 협력 통신을 적용했을 때 그 오버헤드와 간섭 통제할 수 없을 만큼 커지는 현상을 피할 수 있다는 점 때문에 가장 기본적인 접근 방식으로 연구 되어왔다.



(그림 3) 클러스터기반협력통신의기본구조와에너지소모

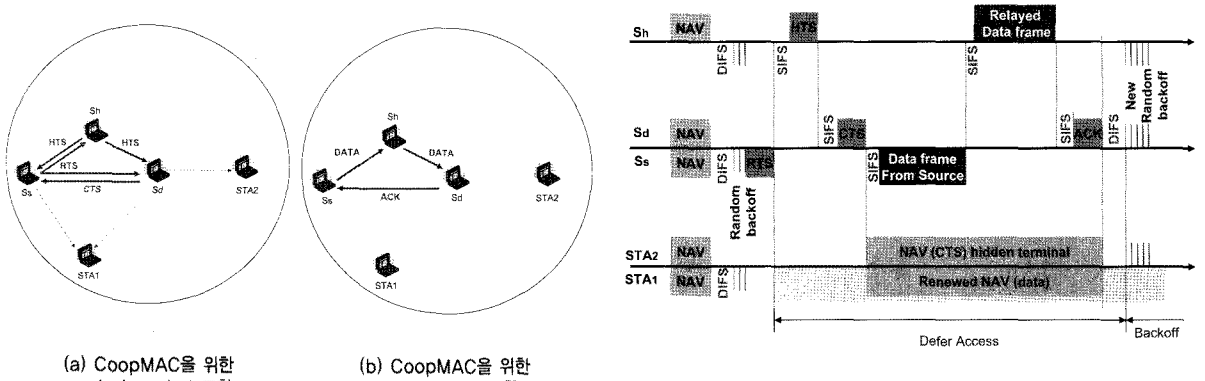
(그림 3)은 클러스터 기반 협력 통신의 기본적인 구조를 나타내고 있다.

이러한 클러스터 기반 협력 통신에서 에너지 소모는 위와 같이 클러스터 내 데이터 수집 및 조합을 위한 에너지 소모(E_{intra})와 클러스터간 통신에서 소모되는 에너지(E_{intra}) 로 나뉠 수 있다. 이를 최소화 하기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

i 클러스터의 구성
ii 몇 개의/ 어떤 노드가 협력통신에 참여할 것인가
iii 클러스터내 통신/클러스터간 통신의 코디네이션 (coordination)

1,2의 과정은 기존의 계층적 토폴로지를 구현하는 연구에서 주요한 이슈로 연구되어왔다. 멀티홉 네트워크에서 각 클러스터의 크기, 클러스터 헤드를 어떻게 결정하고 이들간의 통신 프로토콜을 정의하는 것은 네트워크 전체의 성능에 큰 영향을 끼치는 요인들이다. 3의 과정에서는 클러스터간 채널상태나 에너지 소모를 고려하여 결정해야 할 사항이다. 경우에 따라서 클러스터간 통신은 크게 4형태가 가능하다.(ex. SISO, SIMO, MISO, MIMO) 이러한 링크들의 적응적 선택이 기존의 연구에서 주요하게 다루어져 왔다.

[5]에서는 MIMO-LEACH라는 기법을 통해 위의 문제들을 해결하고자 했다. LEACH [6]는 센서 네트워크에서 계층적 토폴로지를 구현하는 가장 기초적인 라우팅 기법으로 클러스터헤드의 순환적 선출과 클러스터의 주기적 구성을 통해 센서 노드의 에너지 소모를 균일하게 하는 방법을 통해 네트워크의 지속시간을 극대화하는 기법을 취하고 있다. MIMO-LEACH는 이러한 계층적 통신 방법에서 클러스터간 통신에 협력 통신 기법을 적용함으로서 E_{intra} 를 최소화 하고 통신의 신뢰성을 크게 향상시켰다. [7]에서는 이보다 더 발전된 형태의 협력 통신을 제안하고 이를 cMIMO로 명명하였다. 이 논문에서는 각 클러스터 당 두 개의 클러스터 헤드를 선출 한다(master CH, slave CH). 그리고 이 두 노드들이 적응적으로 협력 통신에 참여함으로써 클러스터간 통신이 경우에 따라서 4가지 형태 중 에너지 소모에 최적인 링크를 구성하게 된다. 이러한 방식은 MIMO-LEACH에 비해 크게



(a) CoopMAC을 위한 control packet 교환

(b) CoopMAC을 위한 Data packet 교환

(c) CoopMAC에서의 NAV

(그림 4) CoopMAC의동작

두가지 장점을 가진다. MIMO-LEACH는 데이터를 모으는 역할을 하는 클러스터 헤드와 클러스터 간 통신에 참여하는 협력 노드가 분리되어있어 최소 3개의 노드를 선출한다. 하지만 cMIMO에서는 2개의 클러스터 헤드가 데이터의 수집과 클러스터 통신에 모두 쓰이게 설계하였고 이는 클러스터 구성 과정에서의 오버헤드를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또 MIMO-LEACH에서는 MISO의 형태로 협력 통신을 활용하는 반면, cMIMO는 SISO/SIMO/MISO/MIMO를 모두 활용함과 동시에 각 클러스터 환경에 따라 에너지 소모에 최적인 링크를 선택하는 기법을 제안하고 있어 좀더 에너지 효율적이라 하겠다.

[8] 에서 역시 유사한 접근 방식을 통해 E_{intra}을 최소화 하는 기법을 제안하였다. 단, 이 논문에서는 기존의 심볼 단위의 에너지 소모 가 실제 통신에서는 비현실적인 점을 지적하고, 패킷-에러-rate에 기반한 분석을 통해 이러한 수학적 분석을 통해 실제 통신에 근사한 분석에서도 클러스터간 통신에서 협력 통신을 활용했을 때 에너지 효율성이 단순 통신 방식에 비해 우수하다는 점을 검증하였다.

2. 상위 계층에서의 연구

협력 통신은 물리 계층에서의 diversity gain을 얻어 BER을 낮추기 위해 처음 제안되었다. 하지만 협력 통신은 필연적으로 이웃 노드를 활용하기 때문에 이를 효율적으로 지원하기 위해서 MAC에서의 다양한 이슈가 발생하게 된다. 또 Routing layer에서 역시 협력 통신을 활용해서 경로의 오버헤드를 최소화하는 기법이 많이 연구 되어왔다. 본 장에서는 이와 같은 상위 계층에서의 협력 통신을 위한 기법들을 소개하고자 한다. [9]에서 제안된 CoopMAC은 협력 통신에서 중요한 의미를 갖는다. 릴레이 노드를 포함해서 협력 통신에 참여하는 노드들이 분산적으로 동작해야 하는 환경에서는 더욱 그렇다. 왜냐하면 협력 통신 동안은 모든 노드가 해당하는 통신에 선점되어있어야 패킷 간 충돌을 피할 수 있기 때문이다. CoopMAC에서는 WLAN에서의 CSMA/CA를 기본으로 한 MAC을 제안함으로써 구현에 용이하고 실제 네트워크에서 단순 전송 방식의 기존 통신과 공존할 수 있는 기법을 제안하였다. CoopMAC의 동작을 아래 그림과 같다. 기존의 CSMA/CA는 경쟁을 위한 Backoff 이후에 Hidden node 문제를 해결하기 위해 RTS/CTS를 주고 받은 후에 DATA를 전송한다. CoopMAC은 이러한 과정에 정해진 릴레이의 채널을 확인하기 위한 HTS를 덧붙이는 방식으로 운용된다. (그림 4) 그러나 CoopMAC은 WLAN환경에 적합한 방식으로 제안되었다. 기존의 CSMA/CA가 가지고 있었던 단점인 낮은 throughput과 비효율적인 에너지 소모 문제를 해결하지 못해 센서 네트워크에서는 활용되기 힘든 측면이 있다. 이를 해결한 센서 네트워크에서의 협력통신을 위한 분산적 MAC은 여전히 도전 과제로 남아있다.

이 밖에도 기존의 센서 네트워크의 라우팅 기법을 협력 통신을 이용해 개선하려는 다양한 기법들이 제안되었다. 기존의 라우팅 기법들을 통해 설정하고 이 경로에 있는 링크를 협력 통신을 이용한 링크로 대체하려는 시도는 경로 설정

시 협력 통신을 고려했을 때에 비해 협력 통신의 장점을 최대한 활용하지 못한다. [10]과 [11]은 협력 통신을 활용한 Routing 기법을 제안함으로써 제안된 기법을 통해 설정된 경로는 기존의 단순 전송 방식에 비해 더욱 에너지 효율적인 경로를 찾을 수 있음을 보였다. 하지만 이러한 기법들은 경로 선택 시 너무 많은 오버헤드를 가진다는 점에서 여전히 그 한계를 가지고 있다고 할 수 있다. 특히 실제 네트워크에서 채널 환경이 유동적으로 변한다는 현실을 감안했을 때, 라우팅 경로의 재설정 및 복구의 오버헤드를 고려하지 않은 라우팅 기법들은 그 경로의 효율성에도 불구하고 현실적으로 활용되기 힘들다는 한계를 가지고 있다.

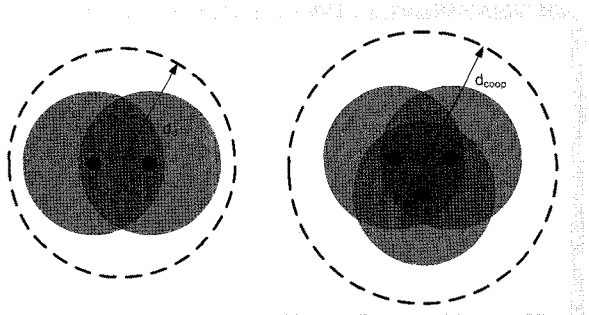
3. 계층간 최적화 (Cross-layer optimization)

이와 같은 협력 통신을 유연하게 사용하기 위한 상위 계층에서의 시스템 설계와 더불어서 계층간 최적화 기법(Cross-layer Optimization)를 통해 시스템 전체의 성능을 향상시키고자 연구도 활발히 진행 중이다. 이와 같은 계층간 최적화 기법은 기존의 센서 네트워크에서 많이 연구되던 주제이지만 협력 통신에서 새롭게 정의 물리 계층에서의 파라미터들을 중심으로 하는 계층간 개념적 장벽을 넘어서는 기법들이 제안되었다.

[12]은 이의 대표적인 예라고 할 수 있다. 멀티 홉 통신에서는 기본적으로 소모 에너지와 딜레이의 트레이드오프가 있다. 더 적은 딜레이를 갖는 전송을 위해서는 많은 전송 에너지를 소모하게 되고, 전송 에너지를 낮추기 위해서는 더 큰 딜레이를 감수해야 한다. [12]에서는 이러한 트레이드오프 커브를 근본적으로 향상시키기 위해 MAC 계층과 Routing 계층의 통합적 설계를 제안하였다. 우선 이를 위해 M x 1 MISO 협력 통신을 SISO모델과 동일한 형태로 모델링하고 이러한 네트워크에서 전송으로 인한 에너지 소모를 최소화하기 위한 TDMA 기반 MAC과 flow control을 제안하였다. 이러한 일련의 이론적 작업들은 협력통신을 사용하지 않았을 때에 비해 에너지소모와 딜레이에 있어서 괄목할만한 성능 향상을 보였다. [13]에서 역시 유사한 접근 방식을 보인다. 동일한 M x 1 MISO 협력 통신 시나리오에서 딜레이와 패킷 손실 비율(packet loss ratio)의 요구 조건 이내에서 통신에 소모하는 에너지를 최소화하기 위해 각 링크의 최적 BER (bit error ratio) 성능을 찾는다.

III. 해결해야 될 과제들

전술한 바, 협력 통신은 다양한 접근 방식을 통해 그 장점을 극대화하기 위한 기법들이 제안되어왔다. 그럼에도 불구하고 현재 협력 통신이 센서 네트워크에서 적극적으로 활용하기 위해서는 여러 기술적 장벽들을 넘어야 한다. 그 첫 번째로는 간섭의 영향을 꼽을 수 있다. 일반적으로 협력 통신은 더 길어진 전송 시간과 낮은 전송 전력으로 인해 낮은 간섭을 갖는다는 장점이 있다. 하지만 릴레이 노드의 위치에 따라 공간적으로는 더 커진 간섭 영역을 만들게 된다. [14]와 [15]에서는 이러한 협력 통신에서의 간섭을 수학적으로 모델링 하고 이들이 특히 멀티홉 통신에서 심각한 성능 저하를 일으킬 수 있다는 사실을 지적하였다. 센서 네트워크에서 사용되는 단말들은 작고 저렴하다는 특성상 제한이 많은 것으로 알려져 있다. 이러한 노드의 특성상 간섭으로부터 신호를 분리해내기 어렵다는 한계를 감안하면 이는 더욱 더 심각한 성능 저하로 나타날 수 있다. 또 노드의 개수가 많거나 토폴로지가 복잡한 네트워크에서는 간섭 문제가 반드시 해결되어야 할 것이다.



(그림 5) 단순 전송 과 협력 통신에서의 간섭 모델

다음으로 해결될 문제는 딜레이 문제이다. 협력 통신은 여러 번에 걸쳐 전송이 이루어지기 때문에 한 링크에서의 딜레이가 필연적으로 커질 수 밖에 없다. 이러한 길어진 전송 시간은 딜레이 문제뿐만 아니라 에너지 소모에도 악영향을 미친다. 센서 네트워크에서 소모되는 에너지는 전송 전력의 크기 보다는 노드의 wake-up time에 좌우 되는 것으로 알려져 있기 때문이다. 이를 해결하기 위해서 적응적 모듈레이

선 이나 네트워크 코딩과 같은 기법들이 필요하다. 일례로 [12]에서는 Alamouti coding을 이용해 클러스터 내부에서의 데이터 교환 없는 MISO를 제안함으로써 딜레이 문제를 해결하고자 하였다.

마지막으로 센서 네트워크에서 사용하는 단말의 근본적 한계를 극복할 수 있는 기법이 제안되어야 한다. 현재 WLAN과 같은 환경에서 주로 제안되었던 기법으로서의 협력 통신은 센서네트워크에서 많은 장점을 내재하고 있음에도 그대로 활용하기에는 시스템에 너무 큰 부담을 준다. 일례로 MRC를 위해 여러 번에 걸쳐 수신이 일어나는 협력 통신에서는 아날로그 신호들을 모두 저장하고 있어야 하는데, 이는 큰 메모리를 요구하게 된다. 이러한 복잡하고 무거운 기법들을 간략화할 수 있다면 협력 통신은 센서 네트워크의 데이터 처리량을 크게 높일 수 있는 기술로 활용될 수 있을 것 이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크을 위한 협력 통신의 연구 현황에 대해 논하였다. 협력 통신은 무선 센서 네트워크의 전송 전력를 낮추고, 데이터 처리량을 늘리기 위해 여러 방식으로 연구되었다. 특히 센서 네트워크의 특성을 살려 공간적 다이버시티를 극대화 하기 위한 클러스터 기반 협력 통신과 계층간 최적화를 통한 성능 향상 들이 많은 논문들이 연구되었고, 이 밖에도 협력 통신을 시스템에서 매끄럽게 적용되기 위한 상위 계층의 프로토콜들이 제안되었다. 하지만 현실적으로 실제 네트워크에서 사용되기 위해서는 여러 문제들이 남아있을 논하였다.

감사의 글

본 연구는 방송통신위원회의 차세대통신네트워크원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음(KCA-2011-08913-04003)

참 고 문 헌

[1] M Agarwal, L Gao, JH Cho and J Wu "Energy efficient broadcast in wireless ad hoc networks with hitch-hiking", Mobile Networks and Applications, Springer, Oct. 2005

[2] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 22, Aug. 2004.

[3] Zhong Zhou, Shengli Zhou, Jun-Hong Cui and Shuguang Cui " Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single ?relay in wireless sensor networks", IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol 7, Aug, 2008

[4] Jin Zhang, Juncheng Jia, Qian Zhang and Eric M. K. Lo "Implementation and Evaluation of Cooperative Communication Schemes in Software-Defined Radio Testbed" IEEE INFOCOM 2010

[5] Yong Yuan, Min Chen and Taekyoung Kwon, "A novel cluster-based cooperative MIMO scheme for multi-hop wireless sensor networks", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2006

[6] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", Proc. 33rd Hawaii Int' l. Conf. Sys. Sci., Jan. 2000.

[7] Mohammad Z. siam , Marwan Kzunz and Ossama Younis, " Energy-efficient clustering/routing for cooperative MIMO operation in sensor networks" IEEE INFOCOM 2009

[8] Zhong Zhou, Shuguang Cui, "Energy-Efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 57, Nov. 2008.

[9] Pei Liu, Zhifeng Tao, Sathya Narayanan, Thanasis

Korakis, and Shivendra S. Panwar, "CoopMAC: A Cooperative MAC for Wireless LANs", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, Feb. 2007

[10] A. E. Khandani, Jinane Abounadi, Eytan Modiano and Lizhong Zheng, "Cooperative routing in static wireless networks", IEEE Transactions on Communications, Vol 55, Nov. 2007

[11] A. Ibrahim, Z. Han, and K. Liu, "Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks", IEEE Transactions on Wirless Communications, vol 7, Oct. 2008.

[12] S. Cui and A. J. Goldsmith, "Cross-layer design of energy-constrained networks using cooperative MIMO techniques" Elsevier Signal Processing, Dec. 2005

[13] Y. Yuan, Z. He and M. Chen, "Virtual MIMO-based cross-layer design for wireless sensor netwoks", IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 22 May. 2006.

[14] Y. Zhu and H. Zheng, "Understanding the Impact of Interference on Collaborative Relays" IEEE Transactions on Mobile Computing, vol 7,Jun. 2008.

[15] S. Vakil and B. Liang, "Cooperative Diversity in Interference Limited Wireless Networks" IEEE Transactions on Mobile Computing, vol 7, Aug. 2008.

약 력

박 세 웅

2009년 서울대학교 학사
2011년 서울대학교 석사
2011년 ~ 현재 서울대학교 박사 과정
관심분야 : WSN 시스템

박 세 웅

1984년 서울대학교전기공학과 학사
1986년 서울대학교전기공학과 석사
1991년 Univ. of Pennsylvania 박사
1991년 ~ 1994년 AT&T BellLab.
1994년 ~ 현재 서울대학교전기컴퓨터공학부교수
관심분야 : 차세대무선네트워크, 네트워크보안