

동일 채널 간섭 환경에서 OFDM 전송 방식을 위한 송신 전력 제어

준회원 박진규*, 종신회원 임창헌**

A Power Control for OFDM Transmission Scheme in a Cochannel Interference Environment

Jinkyu Park* *Associate Member*, Chang Heon Lim** *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 동일 채널 간섭이 존재하는 셀룰러 환경에서 OFDM 통신 시스템들이 각기 목표로 하는 전송 속도를 달성하기 위한 송신 전력 조절 방안을 제시하였다. 일반적으로 다중 반송파 시스템에 대한 최적 또는 준 최적 송신 전력 할당 방안은 주파수 대역별로 채널 상태에 따라 송신 전력을 조절하는 형태인 것으로 알려져 있으며, 이는 WF(waterfilling)이나 IWF(iterative waterfilling) 형태로 발표된 바 있다. 하지만 반송파별로 송신 전력을 달리하는 방식을 구현하기 위해서는 각 대역별 채널 상태와 관련된 정보의 별도의 교환 링크(feedback link)를 통해 수신기에서 송신기로 전송해야 한다. 만약 채널 상태가 빠르게 변하거나 반송파의 개수가 크다면 이로 인한 부담이 상당할 수가 있다. 이에 본 논문에서는 이런 부담을 줄이기 위한 방안으로 반송파마다 동일한 송신 전력을 사용하는 방식에 대한 전력 조절 알고리즘을 제시한다. 그리고 제안한 알고리즘이 수렴한다는 것을 증명하고, 기존의 IWF 방식과 복잡도를 비교하며, 컴퓨터 실험을 통해 수렴 특성을 살펴보고자 한다.

Key Words : Power control, Iterative waterfilling, OFDM, Cochannel interference, Adaptive modulation

ABSTRACT

This paper presents a power control scheme for OFDM based wireless communication systems in a multicell environment with co-channel interference which enables each system to achieve its target level of transmission bit rate. Generally, the optimal or near optimal power control scheme for multicarrier systems is known to control the power level of each subcarrier in accordance with the associated channel status, which may be found in WF(waterfilling) and IWF(iterative waterfilling) schemes. However, this requires the channel state information associated with every subchannel to be fed back from the receiver to its transmitter for successful power control. If the wireless channel exhibits relatively fast fading or the number of subcarriers is large, this may result in a considerable overhead. Here, in order to alleviate this problem, we propose a power control strategy for an OFDM systems maintaining the same power level over all the subcarriers. Also we prove its convergence, compare its complexity with that of the existing IWF algorithm, and examine its convergence characteristic through computer simulations.

※ 이 논문은 2005년도 부경대학교 연구년 교수 지원(PS-2005-024)에 의하여 연구되었음.

* 부경대학교 전자공학과 (saint16@pknu.ac.kr), ** 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (chlim@pknu.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-07-327, 접수일자 : 2006년 7월 31일, 최종논문접수일자 : 2007년 3월 19일

I. 서론

무선 셀룰러 시스템은 통신 서비스 지역을 셀 단위로 분할한 후 일정 거리 간격으로 떨어져 있는 셀이 동일한 주파수를 사용할 수 있게 함으로써 주파수의 이용 효율을 높이는 시스템이다. 비록 동일 채널을 사용하는 셀 사이에 어느 정도의 간격을 유지하여 셀 간의 전파 간섭을 일정 수준 이하로 통제하지만, 기본적으로 동일 주파수 대역을 사용하기 때문에 이로 인해 발생하는 주파수 간섭 현상을 피할 수는 없다^[1]. 이러한 형태의 전파 간섭 현상을 동일 채널 간섭(cochannel interference)라고 부르는데, 특히 주파수 재사용율이 높을수록 이러한 현상은 두드러지게 된다.

셀룰러 시스템에서는 동일 채널 간섭량이 시스템 용량과 밀접한 관련이 있다. 만약 동일 채널 간섭을 줄일 수 있다면 주파수 재사용율을 높일 수 있기 때문에 주파수 이용 효율을 높일 수 있다. 따라서 동일 채널 간섭량을 가능한 한 줄이는 것이 중요한데, 동일 채널 간섭량은 동일 채널을 사용하는 통신 기기의 송신 전력에 따라 달라질 수 있기 때문에, 가능한 한 송신 전력을 낮추는 것이 바람직하다. 그러나 송신 전력은 다른 한편으로는 해당 통신 링크의 전송 성능과 밀접한 관련이 있기 때문에 이를 지나치게 낮추면 전송 성능이 떨어지는 결과를 가져온다. 따라서 통신 기기의 전송 성능을 원하는 수준으로 유지하면서 동시에 동일 채널 간섭을 최소화할 수 있는 송신 전력을 결정하는 방법이 필요하다^[1].

동일 채널 간섭 환경에서 송신 전력을 결정하는 문제에 대한 연구는 1990년 초부터 활발하게 전개되어 현재까지 계속되고 있다. 초기의 중요 연구 결과인 [1]은 주파수 비선택적(frequency nonselective) 페이딩 환경에서 동일한 채널을 사용하는 다수의 통신 링크에 대한 전력 제어 방식에 관한 것으로 SINR 수준이 일정 기준 미만이 되는 확률을 최소화하는 송신 전력 결정 방안을 제시하였다. 여기에서 제시한 방안은 송신 전력을 결정하기 위해 각 통신 링크의 채널 이득 특성뿐만 아니라 서로 다른 링크간의 간섭 채널 이득 특성을 필요로 하기 때문에, 실제 시스템에서 이를 적용하기에는 적합하지 않지만 성능 비교 척도를 제시한다는 점에서 의의가 있다. 이후 [1]의 연구 결과를 토대로 각 통신 기기 차원에서 확보할 수 있는 정보만을 사용하여 송신 전력을 결정하는 분산형 전력 제어 방식이 제안된 바가 있다^[1-3]. 분산형 전력 제어 방식은 개별

통신 기기에서 확보할 수 있는 정보들만으로 전력을 제어하기 때문에 실제 시스템에 적용하기에 적합하다.

송신 전력 조절에 관한 초기 연구는 그 대상이 주파수 비선택적 채널 환경을 대상으로 한 단일 반송파 시스템이었다. 한편, 최근 고속 전송의 필요성에 따라 다중 반송파 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 여기에는 송신 전력 조절에 관한 연구도 포함되어 있다. 예를 들면 DMT방식의 DSL 시스템을 대상으로 발표된 IWF(iterative waterfilling) 방식 등^[4-6]이 있고, 다중 셀 OFDM 또는 OFDMA 시스템을 대상으로 하여 발표된 연구 결과^[7-11]가 있다. 이들 연구 결과들은 각기 다른 특징들이 있지만 기본적으로 부반송파(subcarrier)별로 송신 전력을 조절한다는 점에서 공통점을 갖는다.

일반적으로 주파수에 따라 이득 특성이 달라지는 채널에 대한 최적의 전력 할당 방식은 WF(waterfilling)의 형태를 갖는다는 것은 널리 알려진 사실이다. 그러나 이를 실제 시스템에 적용하려면 송신 측이 채널에 대한 정보나 그에 상응하는 정보를 확보하고 있어야 하므로, 이를 위해 상당량의 관련 정보를 수신기에서 송신기로 전달해야 하는 부담을 갖게 된다. 한편, 송신 전력을 일정하게 하고 변조 레벨만을 조절하더라도 WF를 사용한 방식과 성능면에서 큰 차이가 없다는 연구 결과^[12]가 발표된 바 있다. 이 두 가지 사실에 근거하여 본 논문에서는 좀 더 현실적인 전력 조절 방안으로 모든 부반송파가 동일한 송신 전력을 사용하지만 각 주파수 대역별 채널 상태에 따라 변조 레벨을 달리하는 다중 반송파 전송 방식에 대한 송신 전력 결정 방식을 제안하고자 한다. 아울러 제시한 전력 조절 방식이 수렴한다는 사실을 증명하고, 컴퓨터 실험을 통해 수렴 특성을 살펴보고자 한다.

본 논문에서는 1장의 서론에 이어서, II장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 방식에 대한 시스템 환경을 설명하고, III장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 전력 조절 방식을 소개하며 아울러 그에 대한 수렴성과 복잡도를 살펴보고자 한다. 그리고 IV장에서는 해당 전력 조절 방식의 수렴 특성을 컴퓨터 실험을 통해 살펴본 후, V장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 시스템 환경

본 논문에서 다음과 같은 동일 채널 간섭 환경을

가정하였다. 먼저 동일 채널을 사용하는 다수의 셀이 존재하고, 전송 방식은 OFDM을 사용하는 것으로 설정하였으며, 다중 접속 방식으로는 FDMA나 TDMA를 가정하였다. 그리고 편의상 하향 링크에 대하여 송신 전력을 제어하는 경우를 가정하였다. 상향 링크의 경우에도 유사한 환경이 되기 때문에 동일한 형태의 결과를 도출할 수 있다.

OFDM에서 사용하는 부반송파의 개수를 N_c 로 할 때, 동일 채널을 사용하는 k 번째 기지국의 l 번째 부반송파에서 나타나는 SINR(signal-to-interference plus noise ratio)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SINR_{l,k} = \frac{p_k h_{kk,l}}{\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq k}^{N_c} p_j h_{jk,l} \right)} \quad (1)$$

위 식에서 p_k 는 k 번째 기지국의 송신기에서 한 개의 부반송파 채널에 할당하는 송신 전력을 가리킨다. 그리고 $h_{jk,l}$ 은 j 번째 기지국의 송신 전력이 k 번째 기지국과 통신하는 상대 단말기의 수신 전력에 미치는 비율을 나타내는 채널 이득을 나타낸다. 마지막으로 $\sigma_{l,k}$ 는 k 번째 기지국의 l 번째 부반송파 채널에 존재하는 가산성 잡음(additive noise)을 나타내며, N_c 은 동일 채널을 사용하는 링크의 개수를 가리킨다.

III. 다중 반송파 시스템에 대한 송신 전력 결정 방식

3.1. 제안하는 송신 전력 할당 방식

본 논문에서는 다수의 반송파를 사용하는 시스템을 다루고 있는데, 이 경우에는 개별 부반송파 채널마다 채널 상태가 다르기 때문에 링크의 전송 성능을 표현하는 양으로 수신 SINR을 사용하는 것은 적합하지 않다. 이에 대한 대안으로 본 논문에서는 일정 수준이하의 비트 오류 확률을 유지하면서 한 개의 OFDM 심볼이 전달할 수 있는 비트의 개수를 링크 성능의 척도로 설정하고자 한다.

동일 채널 간섭이 존재하는 경우에 전송 문제는 정보 이론 분야에서 많이 다루어지는 간섭 채널(interference channel)^[14] 문제가 되는데, 이 채널에 대한 이론적인 채널 용량 영역(capacity region)은 알려져 있지 않은 상태이기 때문에 최적의 송신 전력 배분 방식 또한 알려져 있지 않다. 다만 최근 DSL 시스템을 대상으로 발표된 IWF 방식에 대한

연구 결과^[4]에 따르면, WF 방식과 마찬가지로 부반송파 별로 채널 상태에 따라 전력을 배분하면 전송 능력을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 동일 채널 간섭이 존재하는 경우에도 부반송파 별로 송신 전력을 달리하는 방식이 전송 용량을 최대로 하는데 도움이 되는 것으로 짐작할 수 있다. 그러나 실제 시스템에서 부반송파 별로 송신 전력을 조절하려면 부반송파별 채널 상태 정보나 이에 준하는 정보를 제한 채널을 통해 수신기에서 송신기로 전달해야 하는데, 만약 채널 상태가 다소 빠르게 변하거나 사용하는 부반송파의 개수가 많은 경우에는 이로 인한 부담이 상당할 수 있다.

한편, 기존의 연구 결과^[12]에 따르면 부반송파 대역별로 송신 전력을 동일하게 하더라도 부반송파마다 비트 할당을 달리하는 적응 변조 기술을 사용하면 송신 전력을 최적의 형태로 설정한 경우와 비교하여 전송 능력 측면에서 손실이 크지 않은 것으로 알려져 있다. 이에 본 논문에서는 좀 더 현실적인 전력 할당 방안으로 부반송파 별로 송신 전력을 다르게 설정하지 않고 동일한 송신 전력을 할당하면서 부반송파 별로 적응 변조를 함께 사용하는 방식을 제안하고, 이에 대한 송신 전력 조절 방안을 제시하고자 한다. 그리고 한 개의 링크에서 사용하는 총 송신 전력은 일정값 이하로 제한하는 것으로 설정한다.

2절에서 기술한 시스템 환경을 전제로 하여 k 번째 기지국의 l 번째 부반송파 채널의 SINR을 $SINR_{l,k}$ 으로 나타낼 때, 한 개의 OFDM 심볼이 전송할 수 있는 비트의 개수 b_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[9].

$$b_k = \sum_{i=1}^{N_c} \log_2 \left(1 + \frac{SINR_{l,k}}{\Gamma} \right) = \log_2 \left(\prod_{i=1}^{N_c} \left(1 + \frac{SINR_{l,k}}{\Gamma} \right) \right) \quad (2)$$

위 식에서 Γ 는 실제 시스템이 전송할 수 있는 심볼 당 비트 수와 채널 용량간의 차이를 나타내는 파라미터로 SNR gap이라고 불리며, 목표로 하는 BER에 따라 달라지는 값이다. 그리고 식 (1)을 식 (2)에 대입하여 b_k 를 다시 표현하면 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$2^{b_k} = p_i^{N_c} \prod_{i=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{p_i} + \frac{h_{kk,l}}{\Gamma \left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l} \right)} \right\} \quad (3)$$

$$\prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{p_i} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l}\right)} \right\} \leq \prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{\hat{p}_i} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} \hat{p}_j h_{jk,l}\right)} \right\} \quad (7)$$

$$\prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{p_i} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l}\right)} \right\} < \prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\frac{\sigma_{l,k}}{\alpha} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l}\right)} \right\} \quad (8)$$

만약 각 링크의 송신 전력이 위의 조건을 만족한다면 동일 채널 간섭이 존재하는 환경에서 모든 링크가 각자 원하는 수준의 전송 성능을 확보할 수 있음을 의미한다.

한편, 기존의 연구[13]에서는 다양한 형태의 송신 전력 제어 방식을 다음과 같은 형태로 표현할 수 있음을 설명한 바가 있다.

$$\mathbf{P}(t+1) = I(\mathbf{P}(t)) \quad (4)$$

위 식에서 $\mathbf{P}(t)$ 은 시각 t 에서 각 링크마다 사용되는 송신 전력을 원소로 갖는 벡터를 나타내고 $I(\cdot)$ 는 간섭 함수(interference function)라고 불리는 함수로, 시각 $t+1$ 에서 사용할 송신 전력을 결정하는 함수이다. [13]에서는 이런 형태의 전력 갱신 알고리즘을 구성하는 간섭 함수 $I(\cdot)$ 가 표준 간섭 함수(standard interference function)가 되면 해당 알고리즘은 수렴함을 증명한 바 있다.

식 (4)의 형태에 착안하여 식 (3)을 다음과 같은 형태로 변환할 수 있다.

$$p_k = \left[\frac{2^{b_k}}{\prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{p_k} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l}\right)} \right\}} \right]^{1/N_c} \quad (5)$$

식 (5)와 식 (4)를 비교함으로써 k 번째 링크에 대하여 다음과 같은 간섭 함수 $I_k(p_k)$ 를 구성할 수 있고 이를 토대로 식 (4)의 형태를 갖는 송신 전력 갱신 알고리즘을 도출할 수 있다. 이 때 식 (4)의 간섭 함수 $I(\mathbf{p})$ 는 $I(\mathbf{p}) = (I_1(p_1), \dots, I_N(p_{N_c}))$ 의 형태가 된다.

$$I_k(p_k) = \left[\frac{2^{b_k}}{\prod_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{1}{p_k} + \frac{h_{kk,l}}{I\left(\sigma_{l,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_j h_{jk,l}\right)} \right\}} \right]^{1/N_c} \quad (6)$$

3.2. 제안하는 방식의 수렴성

전력 갱신 알고리즘이 갖추어야 하는 중요한 성질

중의 하나는 수렴성이다. 따라서 식 (6) 형태로 표현한 송신 전력 갱신 알고리즘이 수렴하는 지를 확인할 필요가 있다. 앞서서도 언급한 바와 같이 [13]에서 간섭 함수라는 개념을 제안하면서 간섭 함수가 수렴하기 위한 충분조건을 함께 제시한 바가 있으며, 해당 조건을 만족하는 간섭 함수를 표준 간섭 함수라고 지칭한다고 언급한 바가 있다.

간섭 함수 I 가 표준 간섭 함수가 되기 위한 조건은 다음과 같으며, 조건에서 $p > 0, \hat{p} > 0$ 이다.

조건 1. $I(p) > 0$ 이다.

조건 2. 만약 $p \geq \hat{p}$ 일 때 $I(p) \geq I(\hat{p})$ 이다.

조건 3. $\alpha > 1$ 인 모든 α 에 대하여 $\alpha I(p) > I(\alpha p)$ 이 성립한다.

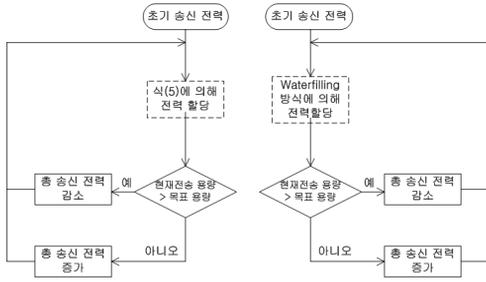
그러므로 만약 식 (6) 형태의 간섭 함수가 표준 간섭 함수에 대한 조건을 만족한다면 해당 전력 갱신 알고리즘의 수렴성이 보장되는 것으로 생각할 수 있다. 그러면 앞에서 제안한 간섭 함수가 표준 간섭 함수가 되는 가를 살펴보고자 한다.

먼저 식 (6)은 $p > 0$ 일 때 항상 $I(p) > 0$ 이 되기 때문에 조건 1을 만족함을 알 수 있다. 그리고 $p \geq \hat{p} (p_i \geq \hat{p}_i, i = 1, \dots, N_c)$ 일 때, 위와 같은 식 (7)의 부등 관계가 성립하므로 $I(p) \geq I(\hat{p})$ 가 되어 조건 2를 만족함을 확인할 수 있다. 마지막으로 $\alpha > 1$ 인 모든 α 에 대해서는 위의 식 (8)과 같은 부등 관계가 성립하기 때문에 조건 3에서 명시한 $\alpha I(p) > I(\alpha p)$ 관계가 만족됨을 알 수 있다. 이상과 같이 본 논문에서 제안한 전력 갱신 방식은 표준 간섭 함수가 되기 위한 충분조건을 만족하기 때문에 수렴한다고 말할 수 있다.

3.3. 제안하는 방식의 복잡도

본 논문에서 제안하는 송신 전력 할당 방식은 각 링크별 목표 전송량을 달성할 수 있는 송신 전력을 결정하는 형태이기 때문에, 이와 비교할 수 있는 송신 전력 결정 방식으로는 IWF 알고리즘이 적합하

다. 두 가지 방식의 복잡도를 비교하기 위해 2가지 척도를 고려하였다. 첫 번째 비교 기준으로는 수신 단말기가 각 부반송파에 대한 송신 전력과 비트 할당을 결정하는 과정에 사용되는 계산량으로 설정하였고, 두 번째 비교 기준으로는 수신 단말기가 기지국으로 전달해야 하는 송신 전력 수준과 비트 할당 정보를 선택하였다.



(a) 제한한 방식 (b) IWF

그림 1. 전력 제어 동작 순서도

첫 번째 비교 기준에 대하여 본 논문에서 제안한 방식과 IWF 방식의 비교를 용이하기 하게 위하여 그림1에 두 가지 방식에 대한 동작 순서도를 도시하였다. 그림에서 보듯이 IWF 방식은 전력 할당 과정 중에서 WF 단계를 포함하고 있는데, 이는 본 논문이 제안하고 있는 방식에서는 식 (5)에 해당한다. WF는 구현 방법에 따라 정도의 차이는 있지만 근본적으로 반복적인 과정을 통해 전력을 할당하기 때문에, 반복적인 과정을 거치지 않는 식 (5)보다 많은 계산량을 필요로 하며, 이런 현상은 부반송파 개수가 커짐에 따라 강해진다.

두 번째 비교 기준과 관련하여 기존의 IWF 방식을 구현하기 위해 필요한 제한 정보량 $L_{FB,IWF}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{FB,IWF} = N_c \times L_{BA} + N_c \times L_{POW} \quad (9)$$

여기서 L_{BA} 와 L_{POW} 는 각 부반송파의 비트 할당 정보와 전력 수준을 표시하는데 사용되는 정보량을 가리킨다. 이와 비교하여 본 논문에서 제안한 방식은 모든 부반송파가 동일한 송신 전력을 사용하는 방식이기 때문에, 이를 구현하는데 필요한 제한 정보량 $L_{FB,CP}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{FB,CP} = N_c \times L_{BA} + L_{POW} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 비교해보면, 본 논문에서 제안한 방식이 필요로 하는 제한 정보량이 IWF방식의 경우보다 $(N_c - 1) \times L_{POW}$ 만큼 작음을 알 수 있다.

기지국과 단말기로 구성된 전체 시스템 관점에서 보면 한 링크의 제한 정보량이 $(N_c - 1) \times L_{POW}$ 만큼 감소한다는 것은 이를 전송하는데 소모되는 단말의 송신 전력이 그만큼 줄어든다는 것을 의미한다. 따라서 동일 채널을 사용하는 단말기들의 송신 전력 감소량 P_D 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_D = N_u \times (N_c - 1) \times P_{L_{POW}} \quad (11)$$

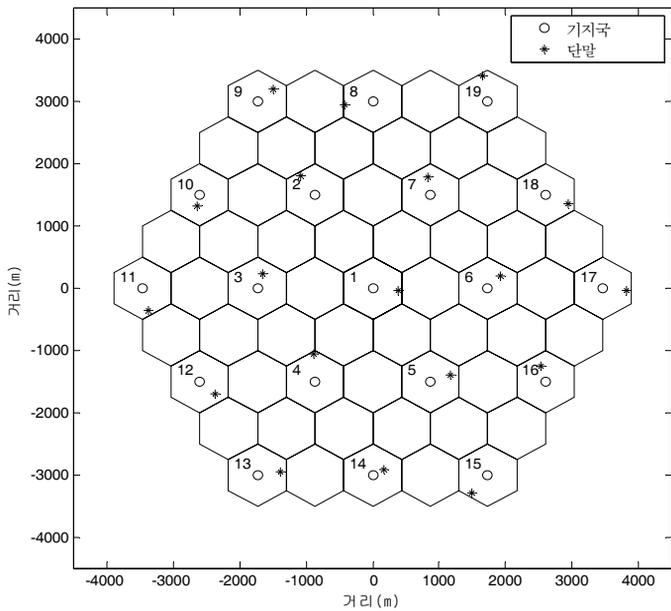
여기서 $P_{L_{POW}}$ 는 부반송파의 전력 수준 정보 L_{POW} 를 전송하는데 사용되는 송신 전력량을 가리킨다.

IV. 컴퓨터 실험 결과

	경로1	경로2	경로3	경로4	경로5	경로6
지연시간	0 μ s	3 μ s	8 μ s	11 μ s	13 μ s	21 μ s
상대적 크기	0dB	-7dB	-15dB	-22dB	-24dB	-19dB
도플러 주파수	0Hz	0.1Hz	2.5Hz	0.13Hz	0.17Hz	0.37Hz
K factor	1	0	0	0	0	0

표 1. 다중 경로 파라미터

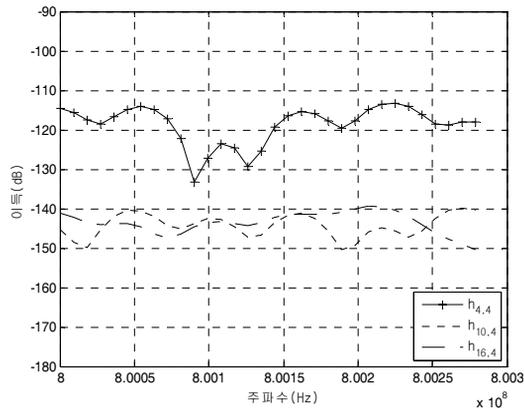
본 논문에서 제안한 송신 전력 갱신 알고리즘의 수렴 특성을 살펴보기 위하여 실제 무선 채널 환경에 근접하게 채널을 모델링하여 컴퓨터 실험을 실시하였다. 먼저 실제적인 셀룰러 시스템의 무선 채널 환경을 구현하기 위하여 몇 가지 설정을 하였다. 먼저 셀의 반경을 1 km로 가정하였고, 단말의 셀내 위치는 균일한 분포(uniform distribution)를 갖는 것으로 설정하였다^[6]. 그리고 주파수 재사용율을 4로 설정하였다. 그림2에서와 같이 인접하는 셀의 개수를 18개로 설정하였고, 그림 2에 있는 셀들이 서로 간섭 영향을 주는 것으로 설정하였다. 경로 손실을 구현하기 위하여 자유 공간 손실(free space loss)과 NLOS(non line of sight) 전송 환경에 대한 경로 손실을 모두 적용시킨 Okumura-Hata 경로 손실 모델 중 도심지에 적합한 모델을 사용하였으며, 다중 경로 페이딩은 각 6개의 경로마다 표1에 있는 파라미터를 사용하여 TDL(tapped delay line) 형태로 모델링 하였다. 이와 같은 설정들을 통해 셀 내의 주파수 응답 특성의 한 사례를 구해보면 그림 3에 나



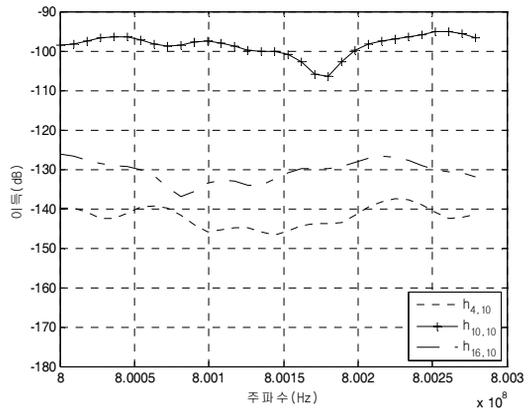
각 단말의 위치(m)		
X좌표	Y좌표	거리
381.1	-37.5	382.8
-1073.9	1812.8	375.5
-1662.8	232.8	242.9
-883.3	-1054.7	445.6
1177.8	-1387.0	331.6
1922.6	198.9	275.4
831.4	1782.1	284.2
415.7	2947.8	418.9
-1489.6	3194.3	310.7
-2632.7	1331.8	171.7
-3377.5	-363.4	373.5
-2372.9	-1696.8	299.0
-1385.6	-2953.6	349.5
173.2	-2915.0	192.9
1489.6	-3.90.7	378.5
2528.8	-1249.9	259.5
3827.8	-30.2	364.9
2944.5	1355.9	375.1
1662.8	3423.3	428.9

*거리는 기지국과 단말과의 거리를 표시함

그림2. 셀의 구조



(a) 4번 셀



(b) 10번 셀

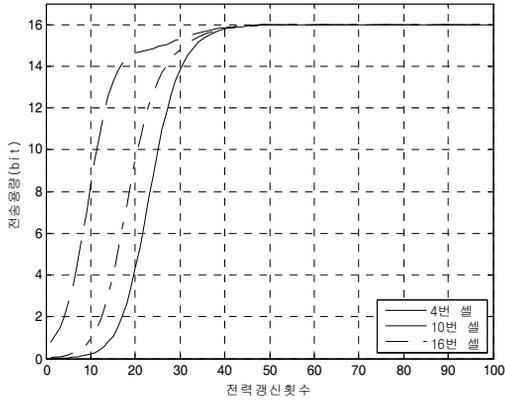
그림3. 주파수 선택적 채널 환경

타낸 바와 같은 결과를 얻을 수 있다.

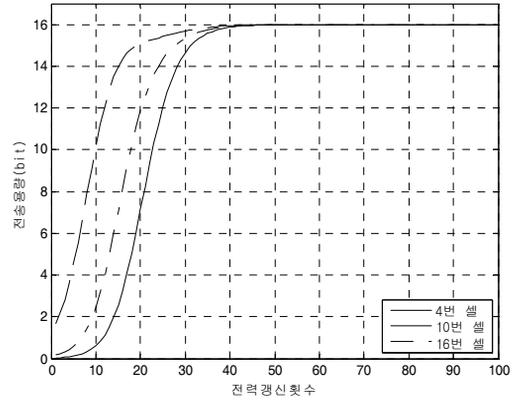
그림 3은 본 논문에서 구현한 19개 셀 중에서 4번 셀과 10번 셀에 대하여 셀 자체가 갖고 있는 링크의 주파수 특성과 동일 채널을 사용하는 다른 셀과의 간섭 링크에 대한 주파수 응답 특성, 즉 식(1)의 $h_{jk,i}$ 를 보여주고 있다. 그림 3에서 “+” 표시가 있는 직선은 각각의 셀 내의 수신기와 송신기 사이의 전달함수 특성을 표시한 것이고, 나머지 직선들은 셀 내의 수신기와 동일 채널을 사용하는 j번째 셀의 송신기 사이의 전달 함수 특성을 표현한 것으로, 총 18개 링크들 중에서 대표적인 예로 그 중 2

개의 링크에 대한 주파수 응답 특성을 표시하였는데 이런 링크들은 k번째 셀의 수신기 입장에서는 간섭 성분들이 된다. 그리고 그림 3에서 볼 수 있듯이 각 송수신기 사이의 거리가 가까울수록 송수신 링크의 주파수 특성이 향상됨을 알 수 있다.

컴퓨터 실험을 위해 각 링크를 통한 데이터 전송과 관련하여 몇 가지 전송 파라미터를 결정하였다. 먼저 각 링크는 32개의 부반송파를 사용하며, 목표 전송 용량은 부 반송파당 0.5 비트로 설정하였다. 그리고 실제 시스템의 전송 용량과 이론적인 채널 용량의 차이를 나타내는 SNR-gap Γ 은

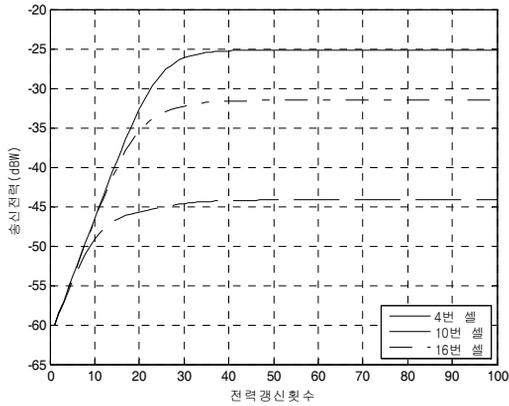


(a) 제안한 방식

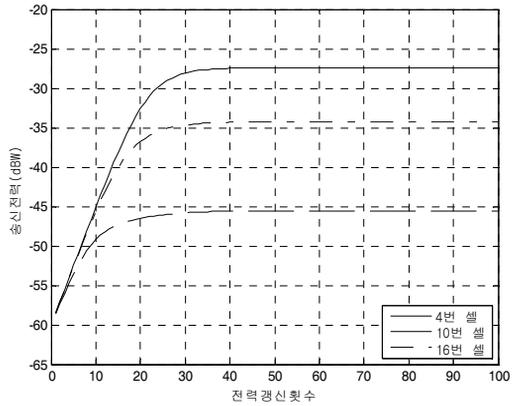


(b) IWF

그림 4. 전력 조절 횟수에 따른 전송 용량 변화 (연속 비트 할당)

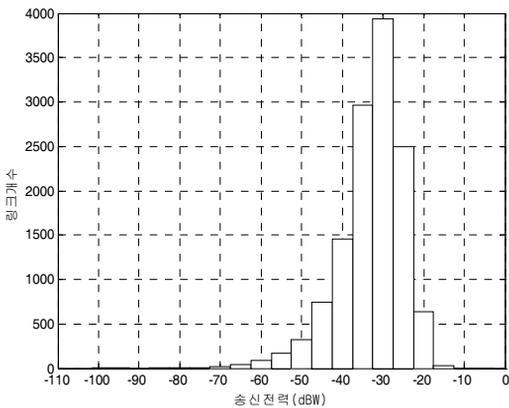


(a) 제안한 방식

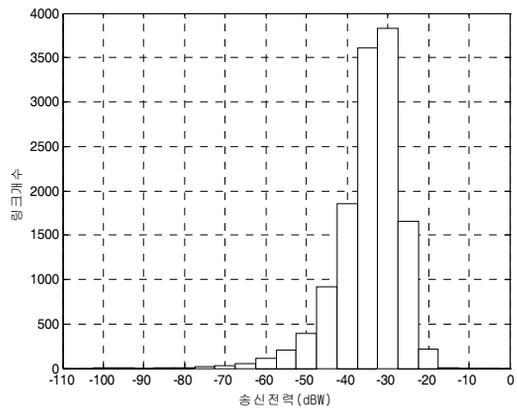


(b) IWF

그림 5. 전력 조절 횟수에 따른 송신 전력 변화 (연속 비트 할당)

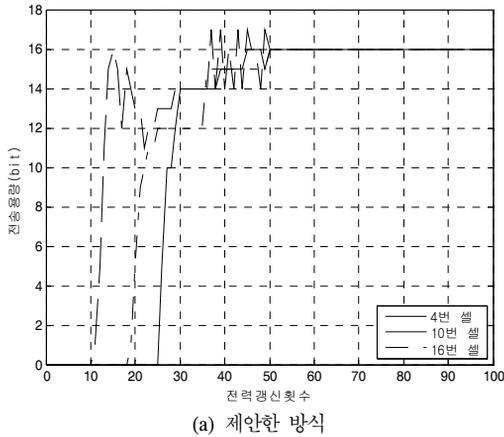


(a) 제안한 방식

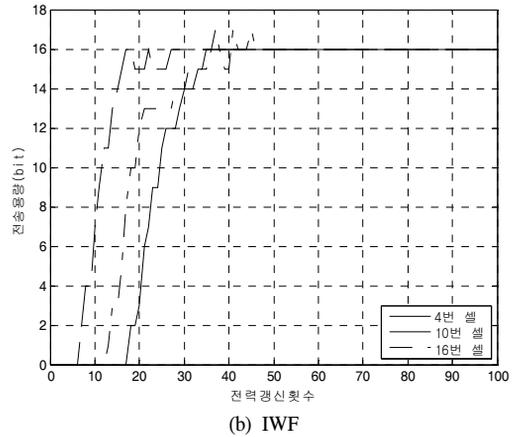


(b) IWF

그림 6. 수렴한 링크의 송신전력 분포 (연속 비트 할당)

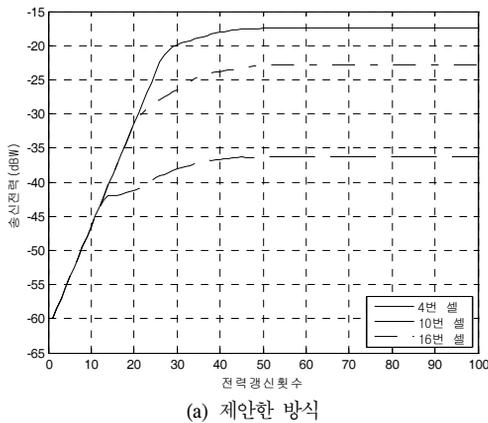


(a) 제안한 방식

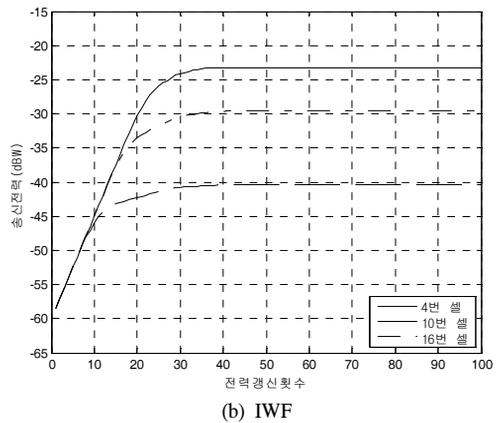


(b) IWF

그림 7. 전력 조절 횟수에 따른 전송 용량 변화 (이산 비트 할당)



(a) 제안한 방식



(b) IWF

그림 8. 전력 조절 횟수에 따른 송신 전력 변화 (이산 비트 할당)

$BER=10^{-6}$ 을 기준으로 해서 9.2dB로 설정하였다.

그림 4와 그림 5의 (a)는 본 논문에서 제안한 방식에 대하여 19개의 링크 중에서 대표적인 3개의 링크에 대한 송신 전력 수렴 특성은 나타낸 것이고 (b)는 IWF 방식에 대하여 동일한 링크의 수렴 특성을 보인 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 두 목표 전송 용량을 만족하기 위하여 각 링크는 송신 전력을 조절하고, 전송 용량이 목표 전송 용량에 도달하면 더 이상의 전력을 조정하지 않기 때문에 세 링크의 송신 전력 모두 목표 전송 용량을 달성할 수 있는 값으로 수렴함을 알 수 있다. 19개의 링크에 대한 송신 전력이 모두 수렴하지만 지면상의 제약 때문에 대표적인 3개의 링크에 대한 결과만을 그림 4와 5에 포함시켰다.

본 논문에서 제안한 방식과 IWF의 송신 전력 성능을 비교하기 위하여 단말의 위치를 무작위로

1000가지 발생시켜, 각 경우에 대한 컴퓨터 실험을 수행하고 각 기지국이 사용하는 송신 전력의 분포가 어떻게 되는지 확인하여 보았다. 그림 6은 각 기지국이 사용하는 송신 전력 분포를 막대 그래프 형태로 나타낸 것이다. 그림을 보면 본 논문에서 제안한 방식이 사용하는 송신 전력이 IWF 방식의 경우에 비해 높은 송신 전력 영역에 분포함을 알 수 있으며, 이를 평균값으로 환산해보면 제안한 방식이 사용하는 평균 송신 전력은 -28.3 dBW인데 반해 IWF 방식의 평균 송신 전력은 -30.3 dBW인 것으로 나타나 평균 송신 전력 측면에서는 IWF가 2 dB 정도 우수함을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 IWF가 부반송파 대역별로 전력 할당을 다르게 배분하기 때문에 나타난 결과이다. 하지만 전체 시스템 관점에서 식 (11)을 고려하면 제안한 방식은 $19 \times (32-1) \times P_{L_{pwr}}$ 만큼의 오버헤드 전력을 줄일 수

있기 때문에, $P_{L_{\text{max}}}$ 의 값에 따라서는 기존의 방식보다 시스템 전체의 전력 사용량 측면에서는 유리할 수 있다.

그림 4의 결과를 얻는 과정에서 한 심볼의 전송 비트는 식 (2)와 같이 연속적인 값을 갖는 것으로 하였다. 이는 부반송파 대역별로 송신 전력을 배분하는 방법에 따라 전송 성능과 송신 전력에 어떠한 영향이 미치는가를 파악하기 위한 것이다.

실제 시스템에서는 한 개의 부반송파가 심볼 구간을 통해 전송할 수 있는 비트 수가 정수로 제한되기 때문에 한 개의 OFDM 심볼이 전송하는 전송 비트 개수를 다음과 같이 변환해야 한다.

$$b_k = \sum_{i=1}^{N_c} \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{SINR_{i,k}}{\Gamma} \right) \right\rfloor \quad (12)$$

위 식에서 $\lfloor a \rfloor$ 는 a 값을 넘지 않는 최대정수를 나타낸다. 동일한 채널 환경에서 그림 4와 5에서처럼 전송 용량과 송신 전력을 수렴 특성을 구해보면 그림 7과 그림 8에 나타낸 바와 같다. 그림 4와 5의 결과와 비교해 볼 때 부반송파 대역별로 할당할 수 있는 비트 개수를 정수로 제한함으로써 송신 전력 및 전송 용량 측면에서 다소 차이가 있지만 세 링크 모두 수렴함을 확인할 수 있다.

V. 결론

고속 전송을 필요로 하는 통신 서비스의 필요성이 대두되면서 이를 무선 채널 환경에서 실현하기 위한 방안으로 다중 반송파를 사용하는 방식에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다. 현재 대부분의 무선 통신 시스템은 셀룰러 구조를 갖고 있는데, 이로 인해 동일 채널 간섭이라는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 통신 환경에서 운용되는 OFDM 시스템을 위한 송신 전력 조절 방안을 제시하였다. 전체로 한 OFDM 시스템은 부반송파별 송신 전력을 개별적으로 조절함으로써 발생하는 부담을 줄이기 위해 부반송파마다 동일한 송신 전력을 사용하는 방식으로, 본 논문에서는 이에 대한 송신 전력 방식을 제안하였고, 해당 알고리즘이 수렴한다는 사실을 증명하였으며, 컴퓨터 실험을 통해 송신 전력 수준과 수렴 특성을 기존의 IWF 방식과 비교하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 방식은 IWF 방식보다 제한 정보량과 송신 전력 계산 복잡도 측면에서 유리하지만 송신 전력을 약간 더 소모하는 것

으로 나타났다. 제한 정보량이 적어진다는 것은 제한 정보를 전송하는데 소모되는 전력이 감소한다는 것을 의미하기 때문에 기지국과 동일 채널 단말기 전체가 소모하는 전력량 측면에서 보면 경우에 따라서는 오히려 제안한 방식이 사용하는 전체 사용 전력량이 IWF를 사용하는 경우보다 작아지는 결과를 가져올 수도 있다. 이를 종합하면 제안한 방식은 휴대 단말 장치가 기지국에 비해 전력 사용과 복잡도에 대한 제약이 큰 셀룰러 환경에 보다 적합한 방식임을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. Zander, "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 41, Issue 1, pp. 57-62, Feb 1992.
- [2] J. Zander, "Distributed cochannel interference control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 41, Issue 3, pp. 305-311, Aug 1992.
- [3] G. J. Foschini and Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 42, Issue 4, pp. 641-646, Nov 1993.
- [4] W. Yu, G. Ginis and J. M. Cioffi, "Distributed multiuser power control for digital subscriber lines," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, Issue. 5, pp. 1105-1115, June 2002.
- [5] S. T. Chung and J. M. Cioffi, "Rate and power control in a two-user multicarrier channel with no coordination : The optimal scheme versus a suboptimal method," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, Issue 11, pp. 1768-1772, Nov 2003.
- [6] J. Lee, R. V. Sonalkar, and J. M. Cioffi, "Multi-user discrete bit-loading for DMT-based DSL systems," *IEEE GLOBECOM 2002*, vol. 2, pp. 1259-1263, Nov 2002.
- [7] C. Yih and E. Geraniotis, "Centralized power allocation algorithms for OFDM cellular networks," *IEEE MILCOM 2003*, vol. 2, pp. 1250-1255, Oct 2003.
- [8] C. Yih and E. Geraniotis, "Power allocation and control for coded OFDM wireless networks,"

IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, vol. 1, pp. 164 - 168, Sept. 2000.

- [9] H. Su and E. Geraniotis, "A distributed power allocation algorithm with adaptive modulation for multi-cell OFDM systems," *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 2, pp. 474 - 478, Sept. 1998.
- [10] L. Yan, Z. Wenan, and S. Junde, "An adaptive subcarrier, bit and power allocation algorithm for multi-cell OFDM systems," *IEEE CCECE 2003*, vol. 3, pp. 1531 - 1534, May 2003.
- [11] G. Kulkarni, S. Adlakha, and M. Srivastava, "Subcarrier allocation and bit loading algorithms for OFDMA-based wireless networks," *IEEE Trans. Mobile Computing.*, vol. 4, Issue 6, pp. 652-662, Nov 2005
- [12] W. Yu and J. M. Cioffi, "On constant power water-filling," *IEEE ICC 2001.*, vol. 6, pp. 1665-1669, June 2001
- [13] R. D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 13, Issue 7, pp. 1341-1347, Sept 1995.
- [14] I. Sason, "On achievable rate regions for the Gaussian interference channel," *IEEE ISIT 2004.*, pp. 1, June 2004.
- [15] X. Qiu and K. Chawla, "On the performance of adaptive modulation in cellular systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, Issue 6, pp. 884-895, June 1999.
- [16] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communication.*, Artech House, 2002.

박진규 (Jinkyu Park)

준회원



2005년 8월 : 부경대학교 전자공학과 (공학사)

2005년 9월~현재 : 부경대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 통신시스템

임창현 (Chang Heon Lim)

중신회원



1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1993년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994년 3월~현재 : 부경대학교

전자컴퓨터정보통신공학부 정교수

<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리, 오디오 부호화