

주파수 중첩 직접 대역확산 통신시스템의 용량에 관한 연구

정회원 한 진 회*, 중신회원 김 상 우**

Capacity of FO/CDMA Communication Systems

Jin Hee Han*, Sang Wu Kim** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 여러 개의 직접 대역확산 (DS/CDMA) 통신시스템이 인접 주파수 대역과 주파수 대역을 부분적으로 중첩하여 사용하는 주파수 중첩 직접 대역확산 (FO/CDMA) 통신시스템을 고려한다. 임의의 주파수 중첩정도에 대하여 인접 시스템으로부터 야기되는 다중접속간섭을 분석하고, 주파수 중첩 시스템의 용량을 광대역 직접대역확산 (WCDMA) 시스템과 비교한다.

최적의 주파수 중첩 정도는 중첩 시스템의 수가 늘어남에 따라서 같이 늘어나게 된다. 그러나, 최대 용량은 최적 개수의 직접대역확산 시스템이 영점간 (null-to-null) 대역폭의 반만큼 인접 시스템과 겹쳐지게 될 때 얻을 수 있다. FO/CDMA 시스템은 WCDMA 시스템과 비교하여, 요구되는 비트 오류 확률 (BER) 이 높거나, 다중경로 신호세기분포 (multipath intensity profile, MIP)의 감소율이 적은 경우에 높은 용량을 나타내고, 그렇지 않은 경우에는 WCDMA 시스템이 더 우월하다.

ABSTRACT

We consider frequency overlapped DS/CDMA (FO/CDMA) communication systems where a number of DS/CDMA systems share frequency bands with adjacent systems. We analyze the multiple-access interference from adjacent systems with arbitrary amount of frequency overlap and compare the capacity of FO/CDMA with that of single wideband CDMA (WCDMA).

The optimum amount of overlap increases with the number of overlapped systems. However the maximum capacity is obtained when the optimum number of systems are overlapped by half null-to-null bandwidth. It is shown that the FO/CDMA yields higher capacity in the case of relaxed BER requirement and low decay rate of multipath intensity profile. Otherwise, WCDMA is superior.

I. 서 론

주파수 중첩 시스템은 Shilling과 Pickoltz에 의해 처음 제안되었다 [1]. 여기서 이들은 주파수 중첩 시스템의 가능성을 보였고, 인접채널로부터의 간섭을 무시할만하다고 가정하고 백색 가우시안 잡음 채널에서의 용량을 분석하였다. 직접 대역확산 (DS/CDMA) 통신 시스템이 주파수 대역에서 중첩

되었을 때, 반송주파수 간격에 따른 인접 주파수 대역으로부터의 간섭은 전력스펙트럼밀도의 비를 이용하여 수치적으로 구해진 바 있다 [2]. 또한, 펄스 성형 필터를 고려한 신호 대 잡음비는 [3]에서 수치적으로 구해졌다.

본 논문에서는, 여러 개의 직접 대역확산 (DS/CDMA) 통신시스템이 인접 주파수 대역과 주파수 대역을 중첩하여 사용하는 주파수 중첩 직접 대역

* 한국전자통신연구원 기지국연구팀

** 한국과학기술원 전기 및 전자공학과

논문번호 : 98321-0803, 접수일자 : 1998년 8월 3일

확산 (FO/CDMA) 통신시스템을 고려한다. FO/CDMA 시스템의 스펙트럼은 그림 1에 도시되어 있다. 이 그림으로부터 각각의 DS/CDMA 시스템은 부분적으로 인접 시스템과 주파수 대역이 겹쳐있음을 알 수 있다. [4]에서는 두 개의 DS/CDMA 시스템사이의 최적 주파수 중첩방안이 논의되었다. 여기서는 시스템의 개수에 제한을 두지 않고, 주파수 선택 레일리 페이딩 채널에서 일반적인 FO/CDMA 시스템과 단일 광대역 직접 대역확산 (WCDMA) 통신시스템의 용량을 비교하여 주어진 주파수 대역에서의 최적 DS/CDMA 시스템 개수와 그 사이의 최적 주파수 중첩정도를 알아본다.

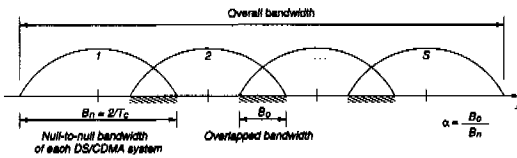


그림 1. FO/CDMA 시스템의 스펙트럼

II. 시스템 모델

본 논문에서는 주파수 대역상의 S개의 DS/CDMA 시스템이 중첩되는 경우를 고려한다. 총 K명의 사용자가 S개의 DS/CDMA으로 고루 퍼져 있다고 가정한다. 각 DS/CDMA 시스템은 똑같은 시스템이고 각 사용자는 고유의 랜덤 코드를 사용하고 있다고 가정한다.

주파수 중첩 정도를 나타내는 파라미터로서 α 를 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha \equiv \frac{B_o}{B_n} \tag{1}$$

위 식에서 B_o 는 인접 시스템과의 중첩된 대역폭을 의미하고, B_n 은 각 시스템의 영점간 (null-to-null) 대역폭을 나타낸다. 예를 들어, $\alpha = 0$ 인 경우는 주파수 중첩이 되지 않은 비중첩 주파수 분할 직접 대역확산 (FD/CDMA)에 해당하고, $\alpha = 1$ 인 경우는 WCDMA에 해당한다.

전체 주파수 대역폭은 고정되어 있다고 가정한다. 그러면, FO/CDMA 시스템의 형태는 앞서 기술한 두 개의 파라미터 S와 α 에 의해서만 결정되어진다. 따라서, FO/CDMA 시스템의 처리이득 N은 다음과 같이 주어진다.

$$N = \frac{N^*}{\alpha + (1-\alpha)S} \tag{2}$$

위 식에서 위첨자 *는 WCDMA의 파라미터임을 의미한다. 식 (2)에서 S=1 이거나 $\alpha=1$ 이라면 N은 N^* 이 된다. 즉, WCDMA는 FO/CDMA의 특별한 경우로도 볼 수 있다.

k번째 송신기와 수신기간의 페이딩 채널은 다중 경로 탭 지연선 모델로 모델링 된다 [5, 730쪽], 즉

$$h_k(\tau) = \sum_l \beta_{k,l} \delta(\tau - lT_c) \exp(j\varphi_l) \tag{3}$$

위 식에서 $\beta_{k,l}$ 과 $\varphi_{k,l}$ 은 각각 시간지연 lT_c 에 해당하는 탭 이득과 위상에 해당한다. 레이크 수신기는 L개의 탭을 가지고 있고, 모든 분해 가능한 다중경로의 이득과 위상정보를 정확히 알고 있다고 가정한다. 각 탭의 이득은 레일리 랜덤 변수이고, 탭 위상은 $[0, 2\pi]$ 사이에서 균일하게 분포한다고 가정한다. 분해 가능한 다중경로의 수, L은

$$L = \left\lfloor \frac{T_m}{T_c} \right\rfloor + 1 \tag{4}$$

와 같이 구할 수 있고, 여기서 T_m 은 다중경로 지연 확산 (multipath delay spread) 이다.

전체 대역폭이 고정되면, 분해 가능한 경로의 수, 칩 간격, 처리이득은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{L^*}{L} = \frac{T_c}{T_c^*} = \frac{N^*}{N} = \alpha + (1-\alpha)S \tag{5}$$

각기 다른 분해 경로의 신호 대 잡음비는 경로 지연에 따라 지수함수로 감소한다고 가정하면

$$E[\beta_{k,l}^2] = \Omega_l = \Omega_0 \exp\left[-\frac{\delta}{L^*} \frac{T_c}{T_c^*} l\right], 1 \leq l \leq L \tag{6}$$

와 같이 쓸 수 있고, 여기서 Ω_0 는 $\sum_l E[\beta_{k,l}^2] = 1$ 을 만족하도록 규준화된다. 또한, 파라미터 δ 는 시간지연에 따른 신호세기의 감소율을 나타낸다. 큰 값의 L^* 는 작은 경로세기 감소율을 의미한다. 칩 간격의 비인 T_c/T_c^* 는 WCDMA와 FO/CDMA간의 경로 신호세기 감소율의 관계를 반영하게 된다.

III. 성능분석

첫 번째 사용자의 레이크 수신기의 입력신호는

다음과 같이 주어진다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{2P\beta_{k,l}} b_{k,l}(t - \tau_k - lT_c) \cdot a_k(t - \tau_k - lT_c) \cos(2\pi f_k t + \varphi_{k,l}) + n(t) \quad (7)$$

여기서 P 는 평균 전송 전력이고, $b_{k,l}(t)$ 와 $a_k(t)$ 는 각각 데이터와 랜덤 코드 신호를 나타낸다. T_s 를 정보비트간격 ($=NT_c$)이라고 하면, 시간지연 τ_k 는 $[0, T_s]$ 사이에서 균일하게 분포한다. f_k 는 k 번째 사용자의 반송주파수이다. $n(t)$ 는 0이 평균이고 양방향 전력스펙트럼밀도가 $N_0/2$ 인 백색 가우시안 잡음이다. 사용자 1이 데이터로 "1"을 전송했다고 가정하면, 레이크 수신기의 출력신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$g(T_s) = \int_0^{T_s} \sum_{l=1}^L r(t + (l-1)T_c) \beta_{1,l} \cdot a_{1(l)} \cos(2\pi f_1 t + \varphi) dt \quad (8)$$

$$= \sqrt{P/2} T_c \left[\sum_{l=1}^L \beta_{1,l}^2 + \sum_{k=2}^K x_{k,1}(\tau_k, \Delta f_{k,1}) \right] + \bar{N}$$

여기서 $x_{k,1}(\tau_k, \Delta f_{k,1})$ 는 $\Delta f_{k,1} (= |f_k - f_1|)$ 만큼의 반송주파수 간격을 가진 k 번째 사용자 신호로부터 야기된 다중접속간섭 항이다. 일단, 변수

$A \equiv \sum_{l=1}^L \beta_{1,l}^2$ 을 조건으로 한 조건부 비트 오류 확률을 구하고, 이를 A 의 확률분포로 평균을 취하여 평균 비트 오류 확률을 구한다. 위의 식에서 \bar{N} 은 0이 평균이고, 분산이 $\frac{N_0 T_s}{4} \sum_{l=1}^L \beta_{1,l}^2$ 인 가우시안 랜덤변수이다.

변수 A 를 조건으로 하면, $x_{k,1}$ 의 평균은 쉽게 0임을 알 수 있고, 분산은 다음과 같이 구할 수 있다 [4].

$$Var[x_{k,1}(\tau_k, \Delta f_{k,1})|A] = \frac{\Lambda(\Delta f_{k,1} T_c)}{3N} \sum_{l=1}^L \beta_{1,l}^2 \quad (9)$$

여기서

$$\Lambda(x) = \frac{6}{(2\pi x)^2} \left[1 - \frac{\sin(2\pi x)}{2\pi x} \right] \quad (10)$$

그림 2에서 볼 수 있는 $\Lambda(x)$ 는 백색 가우시안 잡음 채널에서 대상 사용자와 인접 상호간섭신호의 비에 해당한다. 로피탈(L'Hospital)의 정리를 이

용하여,

$$\lim_{\Delta f_{k,1} T_c \rightarrow 0} \Lambda(\Delta f_{k,1} T_c) = 1, \quad (11)$$

이 됨을 증명할 수 있다. 이는 논문 [6]의 식 (16)의 결과와 일치한다. $\Delta f_{k,1} T_c = 1$ 인 경우, 인접 시스템 사용자로부터의 간섭의 크기는 동일 반송파 사용자의 다중 접속 간섭의 약 15% 정도에 해당하고, $\Delta f_{k,1} T_c = 2$ 인 경우는 4% 정도이다.

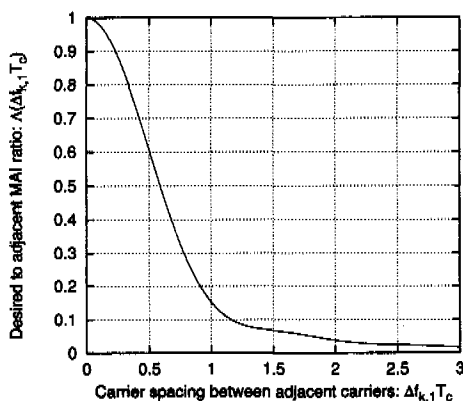


그림 2. 백색 가우시안 잡음 채널에서의 두 인접 시스템간의 반송주파수 간격에 대한 대상 사용자와 인접 상호간섭신호의 비

각 사용자는 독립적인 페이딩을 겪는다고 가정하면, $\{x_{k,1}\}$ 은 통계적 독립이고, 다중접속간섭의 분산은 각 $x_{k,1}$ 의 분산의 합과 같게 된다. 식 (8)과 (9)로부터, 변수 A 를 조건으로 한 조건부 비트 오류 확률 ρ 는 다음과 같다.

$$\rho(\gamma_s) = Q(\sqrt{2\gamma_s}), \quad (12)$$

여기서

$$\gamma_s = \left[\frac{N_0}{E_b} + \sum_{k=1}^K \frac{2\Lambda(\Delta f_{k,1} T_c)}{3N} \right]^{-1} \sum_{l=1}^L \beta_{1,l}^2$$

$$= \sum_{l=1}^L \gamma_l.$$

[5]에서처럼 γ_s 의 확률분포함수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p(\gamma_s) = \sum_{l=1}^L \frac{\pi_l}{\gamma_l} e^{-\frac{\gamma_s}{\gamma_l}}, \quad \gamma_s \geq 0 \quad (13)$$

여기서

$$\pi_i = \prod_{j=1}^i \frac{\bar{\gamma}_j}{\bar{\gamma}_j - \gamma_i} \quad \text{이고}$$

$$\bar{\gamma}_i = \Omega_i \left[\frac{N_0}{E_b} + \sum_{k=2}^K \frac{2A(\Delta f_{k,1} T_c)}{3N} \right]^{-1}$$

식 (12)를 식 (13)으로 평균을 취하면, 평균 비트 오류 확률 P_b 는 다음과 같이 얻어진다.

$$P_b = \frac{1}{2} \sum_i \pi_i \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_i}{1 + \bar{\gamma}_i}} \right] \quad (14)$$

IV. 계산결과 및 고찰

시스템의 성능의 척도로서, 요구 비트 오류 확률을 만족하는 최대 허용 가능한 사용자수로 정의되는 용량을 적용한다. 그림 3에서 용량을 극대화하는 최적 주파수 중첩 정도 α 가 중첩시스템의 수 S 가 커짐에 따라 같이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 최대의 용량은 α 가 0.5 부근의 값일 때 얻어지게 된다. 또한, α 가 0인 비중첩 시스템의 용량은 S 가 증가함에 따라서 확연히 감소하게 됨을 알 수 있다. 일반적으로, 인접 시스템으로부터 오는 다중접속간섭은 α 가 증가하면 같이 증가하게 된다. 하지만, 각 시스템의 대역폭 또한 증가하게 되어서 레이크 수신기에 의한 다이버시티 이득도 같이 증가한다. 그림 3으로부터 우리는 인접 시스템으로부터의 간섭신호에 의한 용량손실보다 레이크 수신기의 다이버시티 이득이 더 크다는 것을 나타낸다.

그림 4는 몇 개의 L^* 값에 대해서 FO/CDMA 의 WCDMA에 대한 용량 이득을 보여준다. 용량이득 곡선은 S 가 증가하면서 극대값을 갖고 이후에는 감소하는 형태로 나타난다. 이는 S 가 커지게 되었을 때 각 시스템의 대역폭이 감소하게 되어 레이크 수신기 이득이 감소하기 때문이다. 또 이 그림에서 L^* 가 커질수록 최적 S 와 용량 이득이 증가하게 됨을 알 수 있다. 그림 3과 4로부터 S 가 증가함에 따라서 최적값 α 는 커지게 됨을 알 수 있다. 그러나, 최대의 용량은 최적 개수의 시스템이 영점간 대역폭의 반정도 중첩되었을 때 얻어지게 된다.

그림 5로부터 FO/CDMA 시스템은 WCDMA 시스템과 비교하여, 요구되는 비트 오류 확률이 높

거나, 다중경로 신호세기분포 (multipath intensity profile, MIP)의 감소율 δ 가 적은 경우에 높은 용량을 나타내고, 그렇지 않은 경우에는 WCDMA 시스템이 더 우월하다는 것을 알 수 있다. 한가지 눈여겨 관찰할 만한 것은 FO/CDMA 시스템이 주파수 비선택 페이딩 채널 즉 L^* 가 1인 경우에 WCDMA 시스템의 용량보다 33%정도 높다는 것이다.

FO/CDMA 시스템의 레이크 수신기에서 필요로 하는 탭의 수는 S 가 커짐에 따라서 감소하게 되고, 따라서, FO/CDMA 시스템의 수신기 복잡도 또한 감소하게 된다.

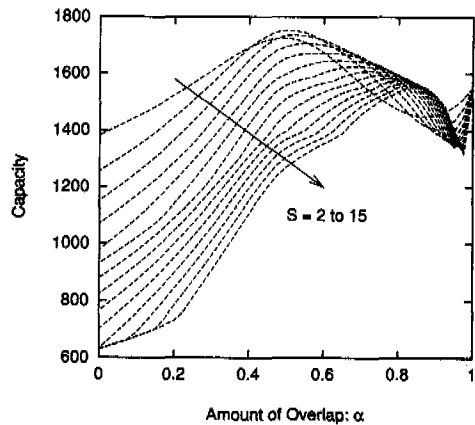


그림 3. α 에 대한 용량 : $\frac{E_b}{N_0} = 10$ dB, $L^* = 12$, $\delta = 2$, $P_{b,m} = 10^{-1}$, $N^* = 1000$.

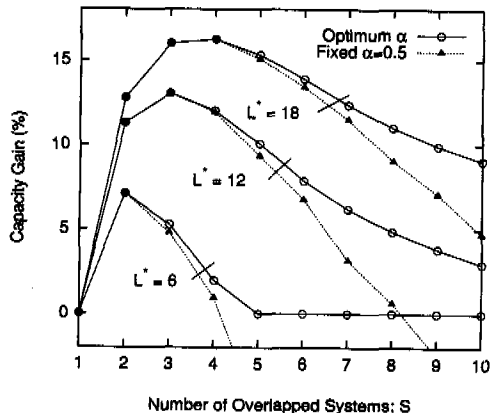


그림 4. WCDMA에 대한 FO/CDMA의 용량 이득: $\frac{E_b}{N_0} = 10$ dB, $\delta = 2$, $P_{b,m} = 10^{-1}$, $N^* = 1000$.

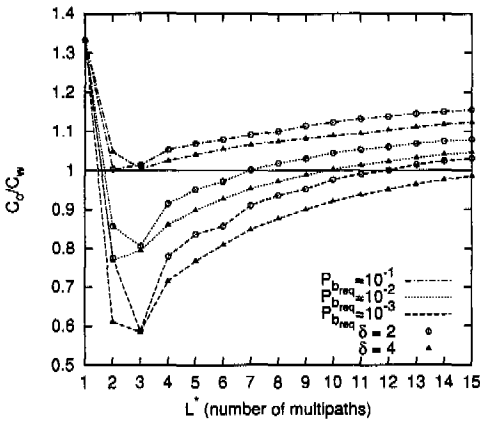


그림 5. L^* 에 대한 용량의 비: C_w (WCDMA의 시스템 용량), C_o (최적 시스템의 개수 ($s \geq 2$)를 가진 FO/CDMA시스템의 용량), $\frac{E_b}{N_0} = 10$ dB, $\delta = 2$, $P_{b,req} = 10^{-1}$, $N = 1000$.

V. 결론

본 논문에서는 여러 개의 직접 대역확산 (DS/CDMA) 통신시스템이 인접 주파수 대역과 주파수 대역을 중첩하여 사용하는 주파수 중첩 직접 대역확산 (FO/CDMA) 통신시스템을 고려하였다. 최적 주파수 중첩 정도는 중첩 시스템의 수가 늘어남에 따라서 같이 늘어나게 됨을 알 수 있었다. 그러나, 최대 용량은 최적 개수의 직접대역확산 시스템이 영점간 대역폭의 반정도가 인접 시스템과 겹쳐지게 될 때 얻을 수 있었다.

수치결과로서 알 수 있듯이, FO/CDMA 시스템은 WCDMA 시스템과 비교하여, 보다 간단하게 구현할 수 있는 장점이 있고, 요구되는 비트 오류 확률 (BER) 이 높거나, 다중경로 신호세기분포 (multipath intensity profile, MIP)의 감소율이 적은 경우에 높은 용량을 나타내고, 그렇지 않은 경우에는 WCDMA 시스템이 더 우월함을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] D. L. Schilling and R. L. Pickholtz, "Improved PCN efficiency through the use of spectral overlay," *Proc. of IEEE International Conf. on Communications*, pp. 243-244, Chicago, U.S.A., June 1992.

[2] F. Behbahani, and H. Hashemi, "On spectral

efficiency of CDMA mobile radio systems," *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, pp. 505-509, New Orleans, U.S.A., May 1994.

[3] J. Lee, R. Tafazolli, and B. G. Evans, "Effect of adjacent carrier interference on SNR under the overlapping carrier allocation scheme," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 171-172, Feb. 1996.

[4] J. H. Han, and S. W. Kim, "Optimal spectral overlay of DS/CDMA communication systems," *Proc. of IEEE International Conference on Universal Personal Communication*, pp. 625-629, Tokyo, Japan, Nov. 1995.

[5] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 2nd ed., NY: McGraw-Hill, 1989.

[6] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication -- Part I: System analysis," *IEEE Tr. Comm.*, vol. COM-25, pp. 795-799, Aug. 1977.

한진희 (Jin Hee Han)

정회원



1969년 10월 19일생

1991년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과
졸업 (공학사)

1993년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과
졸업 (공학석사)

1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업 (공학박사)

1999년 2월 : 한국전자통신연구원

<주관심 분야> 다중반송파 DS/CDMA통신

김상우 (Sang Wu Kim)

종신회원

1958년 5월 21일생

한국통신학회 논문지 제24권 제1B호 참조