

멀티캐리어 DS-CDMA시스템에서 파일럿 채널을 이용한 채널추정의 성능분석

박형근

한국기술교육대학교

Performance of Pilot Channel-Aided Channel Estimation for Multicarrier DS-CDMA

Hyung-Kun Park

Korea University of Technology & Education

E-mail : hkpark@kut.ac.kr

요 약

멀티캐리어 DS-CDMA시스템은 동일 시점에서 파일럿 채널을 제외한 모든 부채널에 동일 한 데이터가 전송된다. 이때 채널 추정을 위한 파일럿 채널의 수가 증가하게 되면 보다 정확한 채널 추정이 가능하나 데이터 채널의 감소로 인해 주파수 다이버시티의 효과가 크게 줄어들게 되어 전체적인 시스템성능을 저하시키게 된다. 따라서 파일럿 채널과 데이터 채널의 수에 대한 tradeoff가 존재하며 채널환경에 따른 요구되는 최적의 파일럿채널의 수가 결정되어야 한다. 본 논문에서는 파일럿 채널을 이용한 채널추정을 갖는 멀티캐리어 DS-CDMA시스템의 성능을 분석하고 채널환경에 따른 최적의 파일럿 채널구조를 제시한다. 전체 전송대역폭을 일정하게 유지했을 때 특정 채널환경에서 전체 부 반송파의 개수 및 파일럿 채널의 개수에 대한 최적값이 존재한다. 본 논문에서는 이와 같은 채널 환경에 따른 파일럿 및 데이터 채널의 최적값을 수학적 분석을 통해 제시한다.

ABSTRACT

In this paper, we evaluate the performance of pilot channel-aided channel estimation for multicarrier direct-sequence (DS) code division multiple access (CDMA) communication system as proposed by Kondo and Milstein [1]. We investigate the optimum number of pilot channels for various coherence bandwidths and different number of subchannels. Keeping the total transmit bandwidth fixed, an optimum number of total subchannels and pilot channels exists under specific channel and transmitted energy. We show that there is a tradeoff between the number of pilot channels and data subchannels, thereby requiring differing numbers of optimum pilot channels according to channel conditions.

키워드

Multicarrier DS-CDMA, Channel Estimation, Pilot channel, Wiener filter

I. 서론

다중경로 페이딩에 강한 특성을 갖고 협대역 간섭을 억제하기 위해 멀티캐리어 DS-CDMA 제안되었다[1]. 이러한 멀티캐리어 CDMA시스템에서 시스템 구조 및 용량 등의 문제와 더불어 채널추정에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 참고 문헌[2]에서 채널추정오류에 따른 비트오율에 대한 성능을 분석하고 있다. 분석 환경은 각각의 부채널의 대역폭이 채널은 코히어런스 대역폭에 대해 일정하게 유지되고 각각의 데이터 채널은 하나의 파일럿 채널을 갖고 있다. 동기 검파의 주요 문제중의 하나는 혼린심볼의 증가없이 어떻게 정확한 채널정보를 찾느냐하는 것이다.

본 논문에서 멀티캐리어 DS-CDMA[1],[2]의 동기검파를 위한 채널추정문제를 고려한다. 그림1은 본 논문에서 고려하고 있는 멀티캐리어 DS-CDMA 송신기의 구조를 보여준다. 본 논문에서는 주파수 영역상관을 이용하기 위해 Wiener필터를 이용한 파일럿 기반의 채널추정에 대한 성능을 분석한다. 부 반송파의 수, 파일럿 채널의 수 그리고 채널의 지연확산에 따른 성능을 분석하였다. 또한 전체 대역폭이 일정할 때 특정 채널환경에 따라 최소의 비트오율을 갖기 위한 최적의 파일럿 채널수와 전체 부채널수를 도출하였다.

II. 멀티캐리어 DS-CDMA시스템 모델

그림 1은 파일럿 채널을 이용하는 멀티캐리어 DS-CDMA 시스템의 송신기 블록도를 보여준다. 이진 데이터 시퀀스 와 파일럿 신호는 확산코드에 의해 대역확산된다. 확산된 신호는 임펄스열을 변조하고 칩성형필터를 통과한다. 전송되는 데이터 신호와 파일럿 신호는 다음과 같다.

$$S_{d,k}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} Bc_k[n]d_k[h]g(t-nT_c) \sum_{m=0}^{M-1} e^{j(\omega_{d,m} + \psi_{d,k,m})} \right\} \quad (1)$$

$$S_{p,k}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} Ac_k[n]g(t-nT_c) \sum_{l=0}^{C-1} e^{j(\omega_{p,l} + \psi_{p,k,l})} \right\} \quad (2)$$

이때 $h = \lfloor n/N \rfloor$ 이고 $g(t)$ 는 칩성형 필터의 임펄스 응답이다. $\omega_{d,m}$ 은 데이터 부채널중 m 번째 부반송파의 주파수이고 $\omega_{p,l}$ 은 파일럿 부채널의 l 번째 부채널의 주파수이다. $\psi_{d,k,m}$ 와 $\psi_{p,k,m}$ 는 데이터 와 파일럿 부채널에 대한 반송파위상을 나타낸다. A 와 B 는 파일럿과 데이터의 신호 진폭을 나타낸다. T_c 은 칩의 길이를 나타내고 M 은 데이터 채널의 개수이고 $M=2^{2m}$ 관계를 갖는다. C 은 파일럿 채널의 개수이고 이때 $C=2^c+1$ 이다. 채널의 상관대역폭이 각 부채널의 대역폭 보다 크다고 가정한다. 즉, 각각의 부채널은 협대역신호로 여겨지고 심볼간 간섭은 무시할 정도로 작다고 가정한다. k 번째 사용자의 n 번째 심볼에 대한 채널의 복소 저역통과 임펄스응답은

$$h_k[n] = [h_{k,1}[n], h_{k,2}[n], \dots, h_{k,M+C}[n]]^T \quad (3)$$

$h_{k,i}$ 는 i 번째 부채널의 채널 임펄스응답이고 복소 가우시안 랜덤변수로 모델링된다. 채널계수는 심볼길이동안 변하지 않고 심볼과 심볼에 따라서 천천히 변한다고 가정한다. T_{ms} 의 지연확산을 갖는 전력 지연프로파일에 대하여 서로 다른 부채널에 대한 상관도는 다음과 같다 [3]

$$R_h(i-l) = E[h_{k,i}h_{k,l}^*] = \frac{1}{1 + j2\pi \Delta_{f,i} T_{ms}} \quad (4)$$

이때 $\Delta_{f,i}$ 는 i 번째와 l 번째 부채널의 주파수간격이다. 일반적으로 상관대역폭은 신호의 자기상관값이 1에서 0.5까지 줄어드는 대역폭을 의미한다[3]. 지수함수의 지연확산을 갖는 Rayleigh 페이딩 채널에서 상관 대역폭은 $B_c = 1/2\pi T_{ms}$ 로 나타낼 수 있다. 완벽한 전력제어를 가정하고 채널의 임펄스 응답이 심볼 구간 내에서 변하지 않는다고 가정하면 채널을 통과하여 수신된 신호는

$$r_d(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^N Bc_k[n]d_k[h]g(t-nT_c-\tau_k) \sum_{m=0}^{M-1} h_{k,m} e^{j(\omega_{d,m} + \psi_{d,k,m})} \right\} + n_w(t) \quad (5)$$

이때 K 는 전체 사용자의 수이고 $n_w(t)$ 는 평균이 0이고 양쪽 스펙트럼 밀도가 $n_0/2$ 인 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 수신된 파일럿 채널 신호는 식(5)와 유사하게 표현될 수 있다. 참고문헌[2]에서 각각의 부채널에서의 칩성형 필터를 통과하여 복조되고 역확산된 신호를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 완벽한 동기를 가정하여 첫 번째 사용자, $k=0$, 에 대한 성능을 분석한다. C 번째 파일럿 채널의 복조기출력은 다음과 같다.

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_C]^T \quad (6)$$

파일럿 신호의 1번째 복조기 출력은 다음과 같다.

$$x_1 = h_{0,1}AN + I_{p,1} + N_I \quad (7)$$

이때 $I_{p,1}$ 는 다른 사용자의 파일럿 채널로 부터의 간섭신호이고 N_I 는 여파된 Gaussian잡음이다. $I_{p,1}$ 항의 간섭신호는 다음과 같이 정의 된다.

$$I_{p,1} = \sum_{m=0}^{N-1} c_0[n]R_{p,1}[n] \quad (8)$$

$$R_{p,1}[n] = \sum_{k=1}^{C-1} h_{k,1}V_k(nT_c) \quad (9)$$

$$V_k(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} Ac_k[n]x(t-nT_c-\tau_k) \quad (10)$$

$$N_I = \sum_{n=0}^{N-1} c_0[\tilde{n}_w(t) * g_i^*(t)]_{t=nT_c} \quad (11)$$

이때 $\tilde{n}_w(t)$ 는 복소 저역통과 등가 백색잡음이다. M 개의 데이터 채널에서의 복조된 출력은

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T \quad (12)$$

데이터 채널의 m 번째 복조기 출력은

$$y_m = h_{0,m}Bd[0]N + I_{d,m} + N_m \quad (13)$$

이때 간섭항 $I_{d,m}$ 는

$$I_{d,m} = \sum_{n=0}^{N-1} c_0[n]R_{d,m}[n] \quad (14)$$

$$R_{d,m}[n] = \sum_{k=1}^{C-1} h_{k,m} \sum_{m=-\infty}^{\infty} Bc_k[n]d_k[n]x(t-nT_c-\tau_k) \quad (15)$$

III. 성능분석

채널추정의 성능을 분석하기 전에 채널이득과 간섭항의 확률특성을 분석해야 한다. 원하는 사용자의 확산시퀀스, $c_0[n]$ 이 deterministic하므로 $E[x_i] = E[y_m] = 0$ 이지만 다른 사용자의 확산 시퀀스는 서로 독립적인 랜덤 이진시퀀스로 간주된다. 서로 다른 부채널에 대한 간섭의 상관값은

$$\frac{1}{2} E[I_{p,i}I_{p,j}^*] = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} c_0[n]c_0[n'] E\{R_{p,i}[n]R_{p,j}^*[n']\} \quad (16)$$

식(9)의 $R_{n,i}$ 정의로부터, $R_{p,i}$ 은 다음과 같다.

$$E\{R_{p,i}[n]R_{p,i}^*[n']\} = \sum_{k=1}^{C-1} E\{h_{k,i}[n]h_{k,i}^*[n']\} A^2 \frac{\sin[\pi(n-n')/T_c]}{\pi(n-n')/T_c} \quad (17)$$

식(17)로부터 $n \neq n'$ 에 대하여 $E\{R_{p,i}R_{p,i}^*\} = 0$ 이다. 수신된 파일럿 채널에서의 간섭항에 대한 covariance 값은

$$\frac{1}{2} E\{I_{p,i}I_{p,j}^*\} = \frac{1}{2} N(K-1)A^2 R_h(i-j) \quad (18)$$

$i \neq j$ 에 대하여 $E[N_i N_j^*] = 0$ 이다. 파일럿 신호의 covariance 값은

$$\frac{1}{2} E[x_i x_j^*] = \frac{1}{2} A^2 R_s(i-j) N^2 + \frac{1}{2} M(K-1) A^2 R_s(i-j) + \frac{\eta_0}{2} N \delta_{i,j} \quad (19)$$

파일럿 채널과 동일한 과정으로 데이터 채널에 대한 분산값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} E[y_m^2] = \frac{1}{2} A^2 R_s(0) N^2 + \frac{1}{2} M(K-1) A^2 R_s(0) + \frac{\eta_0}{2} N \quad (20)$$

채널추정의 오류의 분산값을 최소화하기 위해서 보간필터로서 Wiener filter를 사용한다. 필터의 입력은 파일럿 신호 $x(l)$ 이고 1번째 계수 $w(l, m)$ 은 데이터 부채널의 위치 m 에 의존한다.

$$\hat{h}_m = \sum_{l=1}^C w^*(l, m) x(l) \quad \hat{h}_m = \mathbf{w}^H(m) \mathbf{x} \quad (21)$$

$$\mathbf{w}(m) = [w(1, m), w(2, m), \dots, w(C, m)]^T \quad (22)$$

이때 계수값 $w(m)$ 은 채널추정에러의 분산값을 최소화하도록 선택되어진다. 채널추정에러는 다음과 같이 주어진다.

$$\boldsymbol{\epsilon}(m) = \mathbf{h}_m - \mathbf{w}^T(m) \mathbf{x} \quad (23)$$

서로 다른 파일럿 채널주파수 사이의 상관함수를 나타내기위해 $C \times C$ 의 행렬 \mathbf{R}_H 를 정의한다. \mathbf{R}_H 의 j 행 i 열은 $R_h(i-j)$ 이다. 다음의 \mathbf{R} 은 필터입력 x_1, x_2, \dots, x_c 에 대한 $C \times C$ 의 상관행렬 이다.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2} E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \frac{A^2 N}{2} (\mathbf{N} + K-1) \mathbf{R}_H + \frac{\eta_0 N}{2} \mathbf{I} \quad (24)$$

마찬가지로 \mathbf{p} 는 필터 입력과 원하는 응답 h_m 사이의 $C \times 1$ 교차상관벡터이다.

$$\mathbf{p}(m) = \frac{1}{2} E[\mathbf{x} \hat{h}_m^*] \quad (25)$$

$$p_l(m) = \frac{1}{2} A N R_s(m-l) \quad (26)$$

[4]로부터, 아래의 Wiener-Hopf 수식은 두 개의 상관함수로부터 최적의 필터계수를 정의한다. 필터 입력의 자기상관함수와 필터 입력과 원하는 채널이득 사이의 교차상관은 다음과 같다.

$$\mathbf{R}\mathbf{w}(m) = \mathbf{p} \quad (27)$$

(21)과 (25)로부터 다음을 얻는다.

$$\frac{1}{2} E[\hat{h}_m \hat{h}_m^*] = \mathbf{p}^H(m) \mathbf{w}(m) = \mathbf{p}^H(m) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}(m) \quad (28)$$

(21)과 (24)로부터 추정된 채널이득의 분산값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} E[\hat{h}_m^2] = \mathbf{w}^H(m) \mathbf{R}\mathbf{w}(m) = \mathbf{p}^H(m) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}(m) \quad (29)$$

지금부터 BPSK의 에러확률을 얻으려고 한다. 동일한 총 에너지 E_b 가 모든 부채널에 의해 전송된다면 실제 데이터 비트 에너지는 파일럿 채널의 수에 따라 더 커질 수도 또는 더 작아 질 수도 있다. 수신기는 채널추정을 통해 상관기의 출력을 보정하고 MRC(Maximal ratio combining)

으로 신호를 결합한 후 0값과 비교하여 최종적인 신호를 검출한다.

$$\text{Re} \left[\sum_{m=1}^M y(m) \hat{h}_m^* \right] \stackrel{!}{>} \underset{-1}{0} \quad (30)$$

만약 전송된 심볼이 +1이면 식(30)의 값이 음수이면 에러가 발생한다. MRC단계에서 M쌍의 $y(m)$ 은 서로 독립이고 동일한 확률분포를 갖는다고 가정한다. 서로 상관되어있는 $y(m)$ 과 \hat{h}_m 은 복소값을 갖는 평균이 0인 Gaussian 랜덤변수들로 간주한다. 이들은 다른 $y(l)$ 과 \hat{h}_l 의 쌍과도 독립적이다. 따라서 비트오율은 다음의 식으로 표현될 수 있다 [5], [6].

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 - \rho \sum_{m=1}^M \binom{2m}{m} \left(\frac{1-\rho^2}{4} \right)^m \right] \quad (31)$$

교차상관계수는 다음과 같다.

$$\rho(m) = \frac{E[y(m) \hat{h}_m^*]}{\sqrt{E[y(m)]^2} E[\hat{h}_m^2]} \quad (32)$$

전송 데이터가 $d[0] = +1$ 로 가정했으므로

$$\frac{1}{2} E[y(m) \hat{h}_m^*] = \frac{1}{2} B N E[h_m \hat{h}_m^*] \quad (33)$$

m 번째 데이터 채널에 대한 파일럿 채널 패턴이 대칭적이지 않으므로 교차상관계수 $\rho(m)$ 는 m 의 함수이다. 이때 교차상관계수 채널들에 대한 교차상관값들의 평균은 ρ 로 표현한다.

IV. 성능분석 결과

파일럿 기반 채널추정에서 멀티캐리어 DS-CDMA시스템의 성능은 파일럿 채널의 간격, 채널의 상관 대역폭 그리고 부채널의 수에 좌우된다. 본 논문의 시스템은 전체대역폭이 고정되어 있다고 가정하였으므로 각각의 부채널의 대역폭은 전체 부채널의 수가 증가함에 따라 감소한다. 본 논문에서 채널 추정을 위한 Wiener 필터의 텍계수의 수는 팔릿 채널의 수와 같다고 가정하였다. 서로다른 채널환경에 대한 영향을 보여주기 위하여 $\gamma = B_c / B_{total}$ 를 정의하였다. 이때 B_c 는 상관대역폭이며 B_{total} 는 부채널에 의해 점유되는 채널대역폭이다. 따라서 γ 는 전체 전송대역폭에 정규화된 상관대역폭이다. 파일럿 채널의 수가 증가함에 따라 보다 정확한 채널 추정이 가능해지지만 데이터 채널의 감소로 인해 다이버시티 이득이 줄어들게 된다.

그림2은 $M+C=32,16$ 일때 정규화된 상관대역폭 γ 에 대한 BER성능을 보여준다. γ 값이 증가함에 따라 최적의 파일럿 수는 줄어든다. $0.05 < \gamma < 0.15$ 에서는 $C=8$ 일때 최적의 성능을 나타낸다. 이것은 전체 부채널중 25%가 파일럿 채널로 사용됨을 의미한다. $0.15 < \gamma < 0.45$ 에서는 전체

채널 중 약 12.5%의 파일럿 채널로 이용된다. 그림3 는 파일럿 채널과 전체 부채널의 수에 따른 BER성능을 보여준다. 전체 부채널의 수에 따라 각 부채널의 전송대역폭이 변하게 된다. 최적의 파일럿 채널의 수와 점유되는 대역폭은 전체 부채널의 수에 의해 결정된다. $M+C=32$ 일 때가 $M+C=16$ 일 때에 비하여 더 나은 BER성능을 보여준다. 부채널의 수가 증가함에 따라 최적의 파일럿 채널의 수는 줄어들음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 멀티캐리어 DS-CDMA시스템에서 파일럿 채널에 기반한 채널 추정성능을 분석하였다. 수학적 분석을 통해 비트오율을 유도하고 최적의 파일럿 채널의 수를 도출하였다. 채널추정을 위해서 주파수축 상관을 이용한 Wiener 필터를 적용하였고 서로 다른 부채널의 수와 채널의 지연확산에 대한 최적의 파일럿 채널 수를 도출하였다. 파일럿 채널의 수가 증가함에 따라 보다 정확한 채널추정이 가능해지지만 데이터 채널수의 감소로 인해 다이버시티 이득이 줄어든다. 본 논문에서는 채널의 상관대역폭에 따른 최적의 파일럿의 부 채널 수와 전체 부 채널수를 도출하였으며 최적의 파일럿의 부채널수는 채널의 지연확산과 전체 부채널의 수에 의존함을 보였다.

참고문헌

- [1] S. Kondo and L. B. Milstein, "On the use of multicarrier direct sequence spread spectrum systems", Proc. Milcom'94, pp. 588-599, Oct. 1994.
- [2] Lucy L. Chong and Laurence B. Milstein, "Error rate of a multicarrier CDMA system with imperfect channel estimates," Proc. ICC'00, pp. 934-938, June 2000.
- [3] J. P. Linnartz, et al., "Wireless Communication: The interactive Multi-Media CD ROM," Edition 1999, Baltzer Science Publishers, Netherlands, 1999.
- [4] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, third ed., 1996.
- [5] James K. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," IEEE Trans. on Vehicular Tech. Vol. 40, pp. 686-693, Nov. 1991.
- [6] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, fourth ed., 2000.

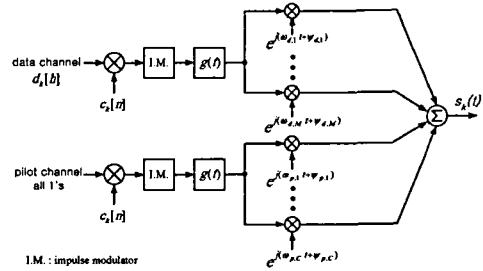


그림 1. Pilot-based multicarrier DS-CDMA transmitter scheme

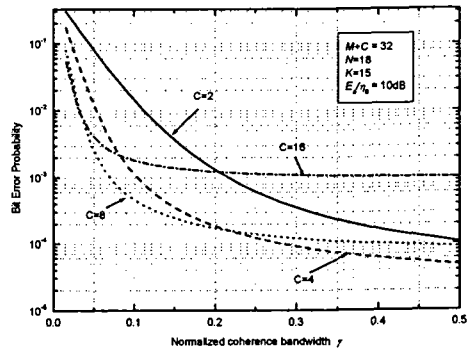


그림 2. BER versus normalized coherence bandwidth, γ

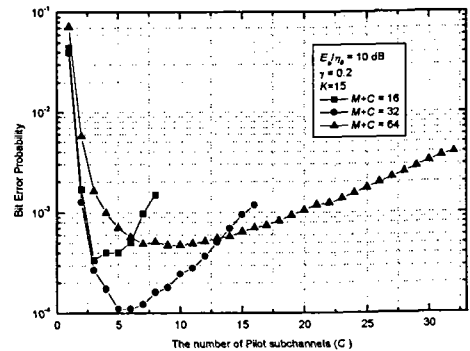


그림 3. BER versus the number of pilot subchannels