

KẾT HỢP ƯỚC LƯỢNG NHIỀU PHA VÀ KÊNH TRUYỀN BIẾN ĐỔI THEO THỜI GIAN CHO HỆ THỐNG OFDM

JOINT PHASE NOISE AND TIME-VARYING CHANNEL ESTIMATION FOR OFDM SYSTEM

Nguyễn Duy Nhật Viễn, Huỳnh Văn Đông, Tăng Tấn Chiến

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: ndnvien@dut.udn.vn, huynhvandong87dn@gmail.com, ttchien@ac.udn.vn

Tóm tắt - Ngày nay, các hệ thống truyền thông vô tuyến thế hệ mới hiện nay đã có được tốc độ cao, băng thông rộng, tuy nhiên chất lượng của hệ thống bị suy giảm đáng kể bởi tác động của nhiễu pha và độ dịch Doppler. Bài báo tiến hành phân tích sự ảnh hưởng, mô hình hóa hệ thống và từ đó ước lượng sự thay đổi của đáp ứng kênh, nhiễu pha trong hệ thống OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Cụ thể, kênh thay đổi theo thời gian và nhiễu pha gây ảnh hưởng đến hệ thống OFDM làm xoay pha tín hiệu, từ đó gây nên giao thoa liên sóng mang, mất đồng bộ, phá hủy tính trực giao của các sóng mang con trong hệ thống. Bài báo kết hợp ước lượng đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian sử dụng khai triển hàm cơ sở và bắt theo sự thay đổi của nhiễu pha sử dụng bộ lọc Kalman. Phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng cho thấy bằng cách sử dụng các thuật toán, sai số trung bình bình phương (MSE: Mean-Squared-Error) của hệ thống được cải thiện đáng kể.

Từ khóa - OFDM; bộ lọc Kalman; ước lượng kênh; nhiễu pha; BEM.

1. Giới thiệu

Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao (OFDM) là kỹ thuật có nhiều ưu điểm hơn so với kỹ thuật ghép kênh phân chia theo tần số (FDM: Frequency Division Multiplexing). Cụ thể, OFDM có hiệu quả sử dụng phổ cao, có khả năng chống chịu nhiễu giao thoa liên ký tự (ISI: Intersymbol Interference) gây ra do kênh phân tán theo thời gian, ổn định trong môi trường fading đa đường. Do vậy kỹ thuật ghép kênh phân chia theo tần số trực giao được áp dụng và sử dụng rộng rãi trong hệ thống thông tin không dây và có dây, ví dụ như như kỹ thuật phát sóng truyền hình mặt đất (DTTB: Digital terrestrial TV broadcasting), đường dây thuê bao kỹ thuật số (DSL: Digital subscriber line), mạng cục bộ (HIPERLANs: High-performance local area networks), và mạng cục bộ không dây chuẩn 802.11a (WLANs: Wireless local area networks) [1], [2]. Và nó cũng rất phù hợp để truyền thông đa phương tiện tốc độ cao trong tương lai [3].

Kỹ thuật điều chế đa sóng mang với phép biến đổi Fourier rời rạc (DFT: Discrete Fourier Transform), OFDM khá hiệu quả trong việc tránh bị ảnh hưởng fading đa đường. Tuy nhiên nó lại nhạy với độ lệch tần số sóng mang trong kênh truyền thay đổi theo thời gian và nhiễu pha. Độ lệch tần số sóng mang giữa máy phát và máy thu do độ dịch Doppler gây nên. Độ dịch Doppler sẽ được phân tích và được mô hình hóa trong mô hình kênh truyền thay đổi theo thời gian, từ đó đưa ra thuật toán ước lượng. Còn nhiễu pha là một quá trình ngẫu nhiên do sự sai lệch tần số giữa bên phát và bên thu gây ra xoay pha, phá hủy tính trực giao của các sóng mang con làm suy hao thành phần tín hiệu, tạo nhiễu giao thoa liên sóng mang (ICI: Inter Carrier Interference). Từ đó gây suy giảm đáng kể hiệu năng của

Abstract - The next generation wireless communication system has high speeds and broad bands. However, the quality of system would significantly degrade because of phase noise and Doppler shift. In this paper, we will analyse the influences of the model system to estimate the change of channel impulse response and phase noise in the orthogonal frequency division multiplexing system (OFDM). Specifically, channel impulse response changes over time and the phase noise which affects the OFDM system by constellation rotation i.e the common phase error, causes synchronous carrier, inter carrier interference (ICI) and recovering clock figure and destroys orthogonally the sub-carrier in the system. The problems on the signal model and estimating model will be presented clearly. In this paper, to estimate channel impulse response time varying, we use the basic expansion model (BEM), and to track phase noise, we use the Kalman filter working in the time domain. Theoretical analysis and the results of emulations show that by using algorithms, the mean squared error of the system is improved significantly.

Key words - OFDM; Kalman filter; channel estimation; phase noise; BEM.

hệ thống OFDM.

Để hạn chế những ảnh hưởng của các yếu tố nêu trên đến hệ thống OFDM. Trong thực tế, nhiều bài báo [4]-[10] đã phân tích và đưa ra nhiều phương pháp khác nhau để cải thiện hệ thống khi có tác động của nhiễu pha hoặc kênh truyền thay đổi theo thời gian. Cụ thể, đối với kênh truyền thay đổi theo thời gian được trình bày trong [7]-[10], còn nhiễu pha được trình bày trong [4]-[6], và đưa đến các kết quả là hiệu năng của hệ thống được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên trong các bài báo thường giả sử hệ thống chịu tác động một trong hai yếu tố kênh thay đổi theo thời gian hoặc nhiễu pha. Trong bài báo này sẽ đề cập đến hệ thống chịu tác động của cả hai yếu tố kênh thay đổi theo thời gian và có ảnh hưởng của nhiễu pha.

Các phần còn lại của bài báo này được trình bày các phần như sau: Phần 2, xây dựng mô hình hệ thống OFDM có ảnh hưởng của nhiễu pha và kênh thay đổi theo thời gian. Phần 3 trình bày kỹ thuật ước lượng sự thay đổi của kênh sử dụng phương pháp khai triển hàm cơ sở BEM. Phần 4 xây dựng bộ lọc Kalman ước lượng sự thay đổi của nhiễu pha. Kết quả mô phỏng và các thảo luận được trình bày trong phần 5. Cuối cùng, kết luận được trình bày trong phần 6.

2. Mô hình hệ thống

2.1. Mô hình hệ thống OFDM

Xét một hệ thống OFDM như hình 1, với phép biến đổi Fourier nhanh (FFT: Fast Fourier Transform) được sử dụng để truyền đa sóng mang. Sau khi biến đổi FFT ngược, khoảng bảo vệ được chèn vào tín hiệu.

Tín hiệu truyền đa sóng mang tại dải nền của ký tự OFDM được cho bởi:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), \quad (1)$$

trong đó $n \in \{-N_g, \dots, 0, \dots, N-1\}$, N_g là chiều dài khoảng bảo vệ, X_k là dữ liệu ở vị trí sóng mang con thứ k trong ký tự đang xét. Dữ liệu nhận được tại máy thu khi truyền qua kênh truyền, sau khi loại bỏ khoảng bảo vệ được biểu diễn như sau:

$$y_n = e^{j\theta(n)} \sum_{l=0}^{L-1} h_{l,n} x_{n-l} + w_n, \quad (2)$$

trong đó $n = 0, \dots, N-1$, L là tổng số đường truyền từ anten phát đến anten thu và w_n là nhiễu Gaussian trắng cộng (AWGN: Additive white Gaussian noise) với phương sai N_0 . Trong bài báo này công suất của tín hiệu truyền và đáp ứng kênh được chuẩn hóa bằng một, từ đó tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR: Signal to Noise ratio) được xác định $SNR = \frac{1}{N_0}$.

Xét trong miền tần số, sau khi thực hiện loại bỏ khoảng bảo vệ và biến đổi FFT, mẫu tín hiệu nhận được trong miền tần số được xác định như sau:

$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-j2\pi kn/N} = H_k X_k + \rho_k + W_k, \quad (3)$$

$$\text{trong đó } H_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_{l,n} e^{-j2\pi kl/N},$$

$$Z_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j\frac{2\pi kn}{N}},$$

$$\rho_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0, i \neq k}^{N-1} X_i \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{l=0}^{L-1} h_{l,n} e^{-j2\pi il/N} \right) e^{j2\pi n(i-k)/N}$$

là nhiễu giao thoa liên sóng mang.

2.2. Mô hình nhiễu pha

Nhiều pha $\phi(n)$ được xem là nhiễu nhân trong kênh truyền [4]

$$\phi(n) = e^{j\theta(n)}. \quad (4)$$

Trong hệ thống OFDM, nhiễu pha sinh ra do sự dao động của cả máy phát và máy thu [4]-[5] và được mô hình hóa như sau:

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \varepsilon(n), \quad (5)$$

Trong đó $\theta(0) = 0$ và $\varepsilon(n)$ là biến ngẫu nhiên có phân bố Gaussian với trung bình bằng không và phương sai của $\sigma^2 = 2\pi\beta T_s$, β là độ rộng dải thông tại mức 3dB trong mật độ phổ công suất Lorentzian của bộ dao động nội [11]-[13].

Hàm tự tương quan của $\phi(n)$ được tính như sau:

$$R_\phi(\tau) = E[\phi(t)\phi(t+\tau)] = e^{-\pi\beta|\tau|} \quad (6)$$

2.3. Mô hình kênh

Giả sử tín hiệu OFDM truyền từ máy phát đến máy thu lan truyền qua kênh fading đa đường gồm có l đường tại

thời điểm thứ m là $h_{l,m}$. Kênh thay đổi theo thời gian có thể đại diện thành mô hình Jakes, hàm tự tương quan của hệ số đáp ứng kênh của đường thứ l được biểu diễn như sau:

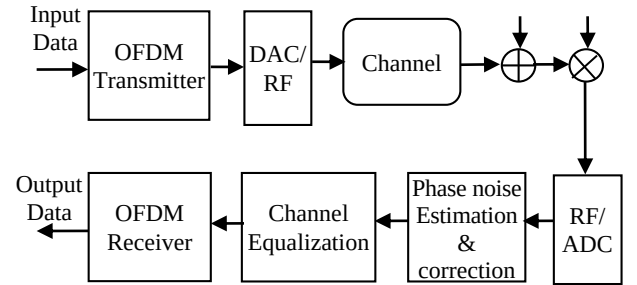
$$E\{h_{l,n} h_{l,k}^*\} = R_l(n-k) = \sigma_{h_l}^2 J_0(2\pi f_d T_s(n-k)), \quad (7)$$

trong đó $\sigma_{h_l}^2$ là công suất của hệ số đáp ứng kênh, T_s là chu kỳ lấy mẫu và f_d là tần số Doppler. $J_0(\cdot)$ là hàm Bessel bậc không.

3. Mô hình khai triển cơ bản BEM

Hệ thống OFDM làm việc trên từng symbol dữ liệu N_s và mỗi symbol truyền trên kênh truyền qua L đường. Trong kênh thay đổi theo thời gian, tổng các tham số ước lượng sau khi loại bỏ tiền tố lặp (CP: Cyclic prefix) sẽ là LN (chúng ta cần biết đáp ứng kênh $h_{l,n}$, với $n = 0, \dots, N-1$, $l = 0, \dots, L-1$), tuy nhiên dữ liệu truyền và nhận trên từng symbol chỉ là N . Do vậy để giảm không gian biểu diễn của kênh, một phương pháp được đề xuất là xấp xỉ kênh thay đổi theo thời gian bằng Q hàm cơ sở $\lambda_{n,q}$, $q = 0, \dots, Q$.

$$h_{l,n} \approx \sum_{q=0}^Q \lambda_{n,q} h_{q,l}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$



Hình 1. Mô hình hệ thống

Hoặc viết dưới dạng ma trận:

$$h_{t,l} = B h_{cl}, \quad (9)$$

$$\text{Với } h_{tl} = [h_{t,0}, \dots, h_{t,N-1}]^T, h_{cl} = [h_{c,0}, \dots, h_{c,Q}]^T,$$

$$B = [\lambda_0, \dots, \lambda_Q], \lambda_q = [\lambda_{0,q}, \dots, \lambda_{N-1,q}]^T.$$

Giá trị của các hàm cơ sở λ_q là cố định, do đó chúng ta chỉ cần xác định $L(Q+1)$ hệ số khai triển $h_{q,l}$ để xấp xỉ đáp ứng kênh với mỗi symbol OFDM. Như vậy vấn đề ước lượng đáp ứng kênh đã được giải quyết nếu chúng ta chọn Q thỏa mãn $L(Q+1) \leq N_p \leq N$, trong đó N_p là chiều dài chuỗi pilot. Thông thường, một số lượng nhỏ các hàm cơ bản có thể cho hiệu năng ước lượng kênh tốt, thực nghiệm cho biết chúng ta nên chọn số lượng hàm cơ sở $Q \geq \nu_D$, trong đó ν_D là độ rộng trải phổ Doppler. Trong hệ thống thông tin di động hiện nay, với tốc độ di chuyển và tần số sóng mang lên đến vài GHz, thì số lượng hàm cơ sở là rất nhỏ ($Q = 1, 2, 3$), có thể cho kết quả ước lượng tốt. Các mô hình khai triển cơ sở (BEM) có thể là BEM hàm mũ phức (CE-BEM), BEM hàm mũ phức tổng quát (GCE-BEM),

KL-BEM, DPS-BEM [10], trong đó CE-BEM, cho bởi:

$$h_{l,n} \approx \sum_{q=0}^Q \lambda_{n,q} h_{q,l}, \quad \lambda_{n,q} = e^{j2\pi qn/N} \quad (10)$$

Trong đó $h_{q,l}$ là hệ số BEM, $\lambda_{n,q}$ là giá trị hàm cơ sở thứ q của CE-BEM và DPS-BEM, được cho bởi:

$$h_{l,n} \approx \sum_{q=0}^Q \lambda_{n,q} h_{q,l}, \quad (11)$$

trong đó $\lambda_{n,q}$ là giá trị hàm cơ sở thứ q của DPS-BEM, dưới dạng vector $\lambda_q = [\lambda_q(0), \dots, \lambda_q(N-1)]^T$ là vector đặt trung của ma trận C:

$$[C]_{n,m} = \frac{\sin[2\pi(n-m)v_{D\max}]}{[\pi(n-m)]} \quad (12)$$

Giá trị tối ưu của hệ số BEM được xác định theo công thức sau [5]:

$$h_{cl} = (\lambda_q^H \lambda_q)^{-1} \lambda_q^H h_{cl} \quad (13)$$

4. Bộ lọc Kalman

Bộ lọc Kalman là một công cụ toán học do Rudolf E. Kalman tìm ra [15]. Mục đích của nó là sử dụng các giá trị đo lường quan sát được. Và giá trị ước tính được từ các giá trị trước đó nhờ mô hình không gian trạng thái của hệ thống để cập nhật lại giá trị ước lượng sao cho gần đúng nhất so với giá trị thật. Bộ lọc Kalman là một thuật toán ước lượng thích nghi, nó có thể được sử dụng để ước lượng quá trình biến đổi nhiều pha trong hệ thống OFDM. Chúng ta có thể ước lượng nhiều pha theo phương trình xử lý (phương trình hệ thống) sau:

$$\theta(n) = a\theta(n-1) + \varepsilon_1(n), \quad (14)$$

Trong đó $\theta(n)$, $\theta(n-1)$ là giá trị nhiều pha tại thời điểm thứ n và giá trị trước đó, $\varepsilon_1(n)$ là biến ngẫu nhiên có phân bố Gaussian với trung bình bằng không và phương sai của $\sigma^2 = 2\pi\beta T_s$. Bên cạnh đó, trong ước lượng sử dụng bộ lọc Kalman, chúng ta luôn có phương trình đo lường hay phương trình quan sát sau:

$$y(n) = \theta(n) + \varepsilon_2(n), \quad (15)$$

Trong đó $y(n)$ là giá trị quan sát được tại thời điểm thứ n . $\varepsilon_2(n)$ là nhiễu quá trình quan sát có phân bố Gaussian và có trung bình bằng không. Từ phương trình hệ thống và phương trình quan sát thông qua bộ lọc Kalman được mô tả trong [14], ước lượng nhiều pha được tính toán bằng tập các phương trình như sau:

Dự đoán:

$$\hat{\theta}(n|n-1) = a\hat{\theta}[n-1|n-1] \quad (16)$$

Tối thiểu lỗi dự đoán

$$M[n|n-1] = a^2 M[n-1|n-1] + \sigma_{\varepsilon_1}^2 \quad (17)$$

Độ lợi Kalman

$$K[n] = \frac{M[n|n-1]}{\sigma_{\varepsilon_2}^2 + M[n|n-1]} \quad (18)$$

Cập nhật và sửa giá trị dự đoán thông qua giá trị đo lường và độ lợi Kalman

$$\hat{\theta}[n|n] = \hat{\theta}[n|n-1] + K[n](y[n] - \hat{\theta}[n|n-1]) \quad (19)$$

Tối thiểu hóa lỗi sau khi cập nhật lại giá trị:

$$M[n|n] = (1 - K[n])M[n|n-1] \quad (20)$$

Các giá trị ban đầu của bộ lọc Kalman, chúng ta thiết lập:

$$\hat{\theta}[-1|-1] = E(\theta[-1]) = \mu_\theta \text{ và}$$

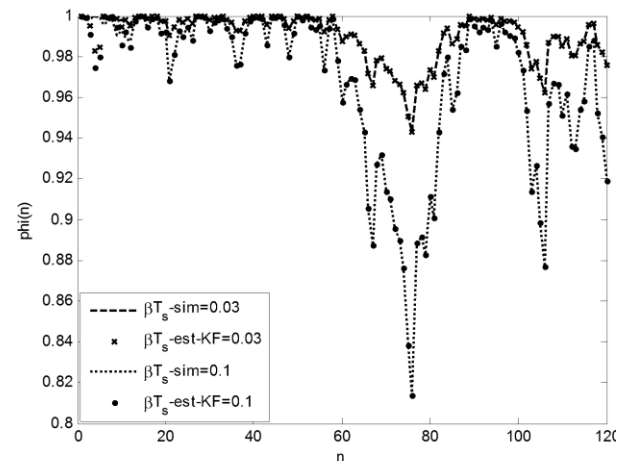
$$M[-1|-1] = E\left[(\theta[-1] - \hat{\theta}[-1|-1])^2\right] = \sigma_\theta^2$$

5. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Từ các phương trình được nêu trên, kết quả mô phỏng ước lượng nhiều pha bằng phương pháp sử dụng bộ lọc Kalman được thể hiện trong Hình 2 và Bảng 1. Trong Hình 2 biểu thị mô phỏng hai đường nhiều pha tương ứng $\beta T_s = 0.03$ và $\beta T_s = 0.1$, sau đó dùng bộ lọc Kalman để ước lượng sự thay đổi của hai đường nhiều pha đó. Từ hình 2 và bảng 1 cho thấy kết quả ước lượng nhiều pha MSE giảm dần tương ứng với βT_s nhỏ và SNR lớn.

Bảng 1. Kết quả MSE của ước lượng nhiều pha

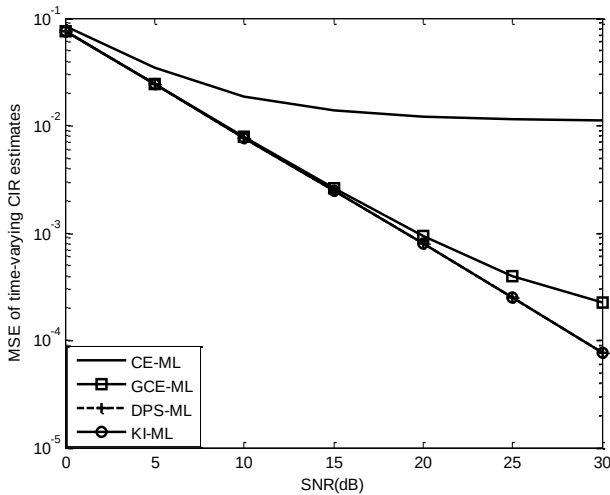
SNR(db)	0	10	20	30
MSE ($\beta T_s = 0.1$)	0.0405	0.0125	0.0030	$4.53 \cdot 10^{-4}$
MSE ($\beta T_s = 0.05$)	0.0236	0.0078	0.0024	$4.09 \cdot 10^{-4}$
MSE ($\beta T_s = 0.005$)	0.0070	0.0026	0.0011	$2.19 \cdot 10^{-4}$



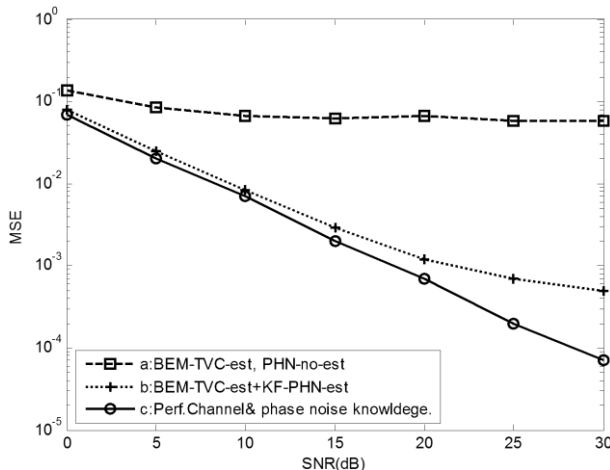
Hình 2. Quá trình thay đổi của nhiều pha và sử dụng bộ lọc Kalman để ước lượng với $\beta T_s = 0.1$ và $\beta T_s = 0.03$

Hình 3. biểu diễn mối quan hệ giữa MSE và tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR của các mô hình BEM khác nhau khi ước

lượng đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian tại vận tốc di chuyển $v=100\text{km/h}$, số đường đa đường $L=5$, tại tần số sóng mang $f_c=2\text{GHz}$, mỗi symbol OFDM có kích thước $N_{\text{fft}}=128$ với tần số lấy mẫu $f_s=1.92\text{MHz}$, và chiều dài tiền tố lặp $N_g=10$ theo các thông số cho hệ thống LTE [16]. Từ hình vẽ này, ta thấy rằng phương pháp ước lượng dựa trên KL-BEM và DPS-BEM rất tốt và cho kết quả như nhau [7].



Hình 3. Ước lượng đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian sử dụng BEM [7] với $v=100\text{km/h}$



Hình 4. MSE cho ước lượng đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian có ảnh hưởng của nhiễu pha sử dụng kết hợp DPS-BEM [7] và bộ lọc Kalman, với $v=100\text{km/h}$, $\beta T_s=0.03$

Hình 4. biểu diễn mối quan hệ giữa MSE và tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR của mô hình kênh biến đổi theo thời gian với vận tốc di chuyển $v=100\text{km/h}$ có ảnh hưởng của nhiễu pha $\beta T_s=0.03$; khi ước lượng kênh có nhiễu pha, sử dụng BEM để ước lượng kênh biến đổi theo thời gian **a**: sử dụng BEM để ước lượng kênh biến đổi theo thời gian kết hợp Kalman Filter ước lượng nhiễu pha **b**: và ước lượng kênh không biến đổi theo thời gian và không có nhiễu pha **c**:. Từ hình vẽ này, ta thấy rằng trong trường hợp có ước lượng kênh biến đổi theo thời gian dùng BEM nhưng không ước lượng nhiễu pha **a**:. khi tỉ số tín hiệu trên nhiễu càng tăng thì sai số trung bình bình phương hầu như không giảm. Điều này được giải thích ảnh hưởng của nhiễu pha đến chất lượng và hiệu năng của hệ thống là đáng kể, do đó

cần phải hạn chế. Và với việc sử dụng bộ lọc Kalman để ước lượng theo quá trình biến đổi và từ đó loại bỏ nhiễu pha cho kết quả khá tốt, như thể hiện trên đường **b**..

6. Kết luận

Trong bài báo này, ước lượng kênh thay đổi theo thời gian có ảnh hưởng của nhiễu pha trong hệ thống OFDM, đã được phân tích và bài báo đã đề xuất một thuật toán ước lượng kết hợp. Cụ thể:

+ Với quá trình thay đổi của nhiễu pha bài báo giới thiệu và sử dụng bộ lọc Kalman để ước lượng. Hiệu năng của thuật toán đã được kiểm tra trong phần mô phỏng và kết quả. Kết quả mô phỏng biểu thị hiệu suất của thuật toán cho kết quả tốt nhất khi tích độ rộng dải thông tại mức 3dB trong mật độ phổ công suất Lorentzian của bộ dao động nội với chu kỳ lấy mẫu <0.1 (thường trong các ứng dụng, độ lệch pha nhỏ hơn 0.01).

+ Với đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian, các thông số của kênh được xấp xỉ bằng mô hình khai triển hàm cơ sở BEM [7]. Các hệ số BEM được ước lượng bằng phương pháp khả giống cực đại (ML: Maximum Likelihood). Lý thuyết phân tích và kết quả mô phỏng cho thấy rằng thuật toán có hiệu suất cao khi tốc độ thuê bao di chuyển nhanh.

+ Với ước lượng đáp ứng kênh thay đổi theo thời gian có ảnh hưởng của nhiễu pha bài báo sử dụng kết hợp DPS-BEM và bộ lọc Kalman. Mặc dù BEM ước lượng khá tốt trong kênh truyền biến đổi theo thời gian nhưng lại không tốt đối với nhiễu pha, trong khi đó thì bộ lọc Kalman lại bám được với sự thay đổi của nhiễu pha nhưng lại không thật sự tốt với hiệu ứng Doppler và sự kết hợp này cho kết quả khá khả quan như trong phần kết quả mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea for whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, pp. 5-14, 1990.
- [2] H.Sari, G. karam, and I. Jeanclaude, "Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, pp. 100-109, 1995.
- [3] G. L. Stuber, J. R. Bary, S. W. McLaughlin, Y.Li, M. A. Ingram, and T.G Pratt, "Broadband mimo-ofdm wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no.2, pp. 271-294, 2004.
- [4] Vien Nguyen-Duy_Nhat, Hung Nguyen-Le, Chien Tang-Tan, "Interference Analysis for OFDM Transmission in the Presence of Time-Varying Channel Impairments", *REV Journal on Electronics and Communications*, Vol. 2, No. 3-4, 2012.
- [5] Songping Wu, Yeheskel Bar-Ness, "OFDM Systems in the Presence of Phase Noise: Consequences and Solutions", *IEEE Transactions on Communication*, vol.52, no.11, pp.1988-1996, 2004.
- [6] Hussein Hijazi, Eric Pierre Simon, Martine Lienard and Laurent Ros, "Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems in Fast Time-Varying Environments", *4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 2010.
- [7] Hung Nguyen-Le, Tho Le-Ngoc, "Pilot-Aided Joint CFO and Doubly-Selective Channel Estimation for OFDM Transmissions", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 56, no. 4, pp. 514-522, 2010.
- [8] Karthik Muralidhar, Kwok Hung Li, "A Low- Complexity kalman Approach for Channel Estimation in Doubly-Selective OFDM Systems", *IEEE Signal Processing letters*, vol.16, no. 7, 2009.
- [9] Rocco Claudio Cannizzaro, Paolo Banelli, Geert Leus, "Adaptive Channel Estimation for OFDM Systems with Doppler spread", *IEEE Signal Processing letters*, 2006.
- [10] Liying Song, Jitendra K. Tugnait, "Doubly-Selective Fading Channel Equalization: A Comparison of the Kalman Filter Approach

- with the Basis Expansion Model-Based Equalizers”, *IEEE Transactions on Communication*, vol. 8, no.1, 2009.
- [11] T. Pollet, M. Bladel, and M. Moeneclaey, “BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise”, *IEEE Transactions on Communication*, vol. 43, pp. 191-193, 1995.
- [12] L. Tomba, “On the effect of Wiener phase noise in OFDM systems”, *IEEE Transactions on Communication*, vol. 46, pp. 580-583, 1998.
- [13] G. J. Foschini and G. Vannucci, “Characterizing filtered light waves corrupted by phase noise”, *IEEE Transactions Inform. Theory*, vol. 34, pp. 1437-1448, 1998.
- [14] Steven M. Kay, “Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory”, Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ 07458.
- [15] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems”, *ASME Journal of Basic Engineering*, pp.35-45, 1960.
- [16] 3GPP, “UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System architecture Evolution (SAE)“, May 2008. <http://www.3gpp.org/Highlights/LTE/>

(BBT nhận bài: 05/05/2014, phản biện xong: 16/06/2014)