

تخمین همزمان آفست زمانی و آفست فرکانس حامل در سامانه‌های ارتباطی مبتنی بر پخش ویدئوی دیجیتال

محمود محصل فقهی^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - mohasselfeghi@tabrizu.ac.ir

چکیده: یکی از نیازهای همیشگی و روبه‌رشد شبکه‌های بی‌سیم پهن‌بند نسل آتی فراهم کردن نرخ‌های ارسال زیاد برای کاربران است. یکی از راه‌حل‌های ارائه‌شده برای این منظور استفاده از مدولاسیون OFDM است که علاوه بر مزیت فراهم آوردن نرخ بالا، از طیف فرکانسی به‌صورت بهینه استفاده کرده و در برابر تداخل بین سمبولی نیز مقاوم است. بر این اساس، این مدولاسیون در استانداردهای مختلفی از جمله استاندارد پخش ویدئوی دیجیتال (DVB) مورد استفاده قرار گرفته است. از طرف دیگر، مسئله همزمان‌سازی زمانی و فرکانسی یکی از مسائل مهم در طراحی سامانه‌های مخابراتی است، به‌طوری‌که عدم انجام موفق آن باعث افت قابل ملاحظه عملکرد می‌شود. بر این اساس، در این مقاله تخمین همزمان آفست زمانی و آفست فرکانس حامل در یک سامانه مخابراتی مبتنی بر DVB مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. با توجه به عدم به‌کارگیری دنباله آموزشی در استاندارد DVB، روش‌های مختلف همزمان‌سازی ارائه‌شده در مراجع که مبتنی بر داده آموزشی نیستند، مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت و بهترین آن‌ها از لحاظ عملکرد انتخاب خواهد شد. سپس عملکرد روش انتخابی با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری در کانال AWGN و نیز کانال محوشدگی چندمسیره مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب و کاربردی بودن روش انتخابی را نشان خواهند داد.

واژه‌های کلیدی: آفست فرکانس حامل، پخش ویدئوی دیجیتال، تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد، تخمین ابتدای سمبول، همزمان‌سازی.

Joint Time and Carrier Frequency Offset Estimation in Communication Systems Based on Digital Video Broadcast

M. Mohassel Feghi¹, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: mohasselfeghi@tabrizu.ac.ir

Abstract: One of the permanent and ever increasing requirements of next generation broadband wireless networks is providing the users with high data rates. One of the solutions for this issue is the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), which not only provides high rates but also uses spectrum optimally and is robust against Inter-Symbol Interference (ISI). In this regards, it is employed in many standards, such as Digital Video Broadcast (DVB). On the other hand, time and frequency synchronization is one of the main issues in designing any communication system and synchronization error may degrade the performance of the system substantially. In this paper, joint time and carrier frequency offset estimation in a communication system based on DVB is considered. As in the DVB standard no training sequence or preamble is used, therefore we study and compare synchronization methods presented in the literatures which are not based on using such training sequences. We choose a method with the best performance among studied methods. Also, using computer simulation, we study the performance behavior of the best selected method in AWGN as well as multipath fading channels. Simulation results show that the selected method provides desirable performance in practical systems.

Keywords: Carrier frequency offset, digital video broadcast, orthogonal frequency division multiplexing, symbol timing estimation, synchronization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰ و ۱۳۹۶/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶

نام نویسنده مسئول: محمود محصل فقهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

نسل آتی شبکه‌های بی‌سیم پهن‌بند نیازمند فراهم آوردن نرخ‌های داده زیاد برای کاربران است. یکی از مدولاسیون‌های غالب بکار رفته در این شبکه‌ها OFDM است [۱]. OFDM یک نوع مدولاسیون چندحاملی^۱ است که در آن زیرحامل‌ها برهم عمود هستند. این مدولاسیون دارای ویژگی‌هایی است که بسیار مورد توجه مهندسان حوزه مخابرات می‌باشد، از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به (۱) بهینگی در طیف فرکانسی، (۲) مقاومت در برابر تداخل بین سمبولی، (۳) امکان ارسال داده با نرخ بالا و ... اشاره نمود [۲]. بر این اساس OFDM در استانداردهای مخابراتی تلویزیونی دیجیتال مختلفی از جمله پخش دیجیتال سرویس‌های مجتمع زمینی (ISDB-T^۲)، پخش چندرسانه‌ای زمینی دیجیتال (DTMB^۳) و نیز پخش ویدئوی دیجیتال زمینی (DVB-T^۴) مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

مسئله تخمین زمان شروع سمبول و تخمین آفست فرکانس حامل یکی از مسائل مهم در سامانه‌های مخابراتی پخش هستند، به‌نحوی که عدم تخمین دقیق موارد فوق باعث افت عملکرد سامانه و نیز افت کیفیت سیگنال دریافتی خواهد بود که می‌تواند شامل داده، صوت یا تصویر باشد [۴]. این مسئله در OFDM بسیار حائز اهمیت است چراکه عدم همزمان‌سازی زمانی و فرکانسی سبب تداخل بین سمبولی و نیز عدم تعامد زیرحامل‌ها و به دنبال آن ایجاد تداخل بین زیرحامل‌ها می‌شود و در نهایت احتمال خطای ارسال داده افزایش می‌یابد.

روش‌های مختلف تخمین زمان سمبول و نیز تخمین آفست فرکانس حامل را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود: (۱) روش‌هایی که از دنباله آموزشی^۵ یا سرآغازها استفاده می‌کنند و (۲) روش‌هایی که از دنباله آموزشی یا سرآغازها استفاده نمی‌کنند. بر این اساس، در حالت کلی تخمین آفست زمانی به دو روش کلی می‌تواند انجام شود: (۱) تخمین به روش همبستگی متقابل سیگنال دریافتی و سیگنال سرآغاز و (۲) تخمین به روش خودهمبستگی سیگنال دریافتی با شیف‌ت یافته خودش. تخمین آفست فرکانسی نیز در دو بخش انجام می‌گیرد که شامل تخمین آفست فرکانس حامل کسری و تخمین آفست فرکانس حامل صحیح می‌باشد.

در مقابل استانداردهای دیگری همچون Wimax [۵] و IEEE 802.11 یا WLAN که از دنباله آموزشی استفاده می‌کنند [۶]، در استاندارد پخش ویدئو دیجیتال (DVB) از دنباله آموزشی استفاده نمی‌شود [۷]. از جمله روش‌های مبتنی بر استفاده از سرآغاز که قابل استفاده در استاندارد IEEE 802.11 می‌باشد، می‌توان به روش Minn اشاره کرد که در [۸] معرفی شده است. در روش Minn سیگنال سرآغاز به L بخش هم‌طول (M نمونه‌ای) تقسیم می‌شود و هر قسمت بر اساس الگوی مشخص در عدد ۱ و ۱- ضرب می‌گردد. روش دیگری که مبتنی بر استفاده از سرآغاز است توسط Seung برای کانال محوشدگی رایلی در [۹] ارائه شده است. در [۱۰] از دنباله z-adoff-

chu به‌عنوان دنباله آموزشی برای همزمان‌سازی سامانه‌های مخابرات صوتی در زیردریا استفاده شده است و در [۱۱] همزمان‌سازی در سامانه‌های OFDM/OQAM بر اساس استفاده از سرآغاز در کانال AWGN مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در [۱۲] از حسگری فشرده با به‌کارگیری داده آموزشی برای همزمان‌سازی بهره‌برداری شده است.

از طرف دیگر، روش‌های تخمین آفست زمانی و آفست فرکانس حامل که مبتنی بر استفاده از داده‌های آموزشی نیستند شامل روش بیشینه همبستگی (MC) [۱۳]، بیشینه همبستگی نرمالیزه (MNC) [۱۴]، بیشینه درست‌نمایی (ML) [۱۵]، روش ارائه‌شده در [۱۶] و نیز روش ارائه‌شده توسط Speth [۱۷] هستند که در ادامه به‌اختصار شرح داده خواهند شد.

در این مقاله، به همزمان‌سازی زمانی و فرکانسی در سیستم‌های مبتنی بر OFDM پرداخته شده است. به‌طور خاص استاندارد DVB که مبتنی بر OFDM است، مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا استاندارد مربوطه به‌طور خلاصه معرفی و پارامترهای اصلی آن‌ها ارائه شده است. سپس چندین الگوریتم برای همزمان‌سازی زمانی و فرکانسی قابل به‌کارگیری در استاندارد فوق‌الذکر معرفی شده است. در ادامه با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده در کانال AWGN مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین الگوریتم از لحاظ عملکرد انتخاب شده است. سپس الگوریتم انتخابی که دارای بهترین عملکرد در کانال AWGN است، در کانال واقعی‌تر محوشدگی چندمسیره مورد بررسی و تحلیل عملکردی قرار گرفته است. همچنین احتمال عدم آشکارسازی و نیز احتمال هشدار غلط در شرایط فوق مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً در شرایطی که آفست فرکانس حامل در نتیجه تغییرات محیطی دچار تغییر گردد، امکان رهگیری این تغییرات مورد سنجش قرار گرفته است. بر اساس چنین ارزیابی‌هایی می‌توان به کاربردی بودن روش انتخابی و امکان به‌کارگیری آن در سامانه‌های عملی پی برد.

۲- معرفی اجمالی استاندارد DVB

۲-۱- صورت فلکی سیگنال و نحوه نگاشت

مدولاسیون‌های استفاده‌شده در استاندارد DVB عبارتند از: QPSK، 16-QAM، 64-QAM، 16-QAM، 64-QAM، 16-QAM غیریکنواخت و Gray می‌باشد. همچنین نقاط صورت فلکی به‌صورت نرمالیزه هستند.

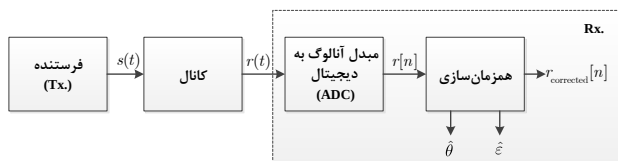
۲-۲- ساختار فریم OFDM

سیگنال ارسالی بر اساس فریم‌ها دسته‌بندی و ارسال می‌شود. هر فریم دارای دوره زمانی T_F می‌باشد و شامل ۶۸ سمبول OFDM است. چهار فریم یک سوپر فریم را تشکیل می‌دهند. هر سمبول شامل مجموعه‌ای از $K=6817$ حامل در مود 8K و $K=1705$ حامل در مود 2K می‌باشد

حامله‌ای TPS شامل اطلاعاتی در مورد مود ارسال، مدولاسیون، GI، نرخ کدینگ، تعداد فریم‌ها و غیره بوده و در اندیس‌های مشخص شده در استاندارد ارسال می‌شوند. برای توضیحات بیشتر درباره استاندارد DVB به مرجع [۷] مراجعه کنید.

۳- همزمان سازی زمانی

در این بخش روش‌های مختلفی که برای همزمان سازی زمانی ارائه شده است، مختصراً شرح داده می‌شود. بلوک دیاگرام مبنا که حاوی نمادگذاری مورد استفاده در این مقاله است در شکل ۳ آمده است.

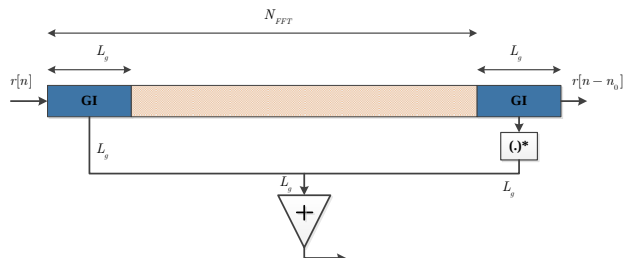


شکل ۳: بلوک دیاگرام مبنا حاوی نمادگذاری مورد استفاده

یک روش برای همزمان سازی زمانی در سیستم‌های DVB استفاده از خودهمبستگی روی GI سیگنال DVB است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$c[n, N_{FFT}] = \sum_{i=0}^{L_g-1} r^*[n+i]r[n+i+N_{FFT}] \quad (3)$$

اصول این روش در شکل ۴ نشان داده شده است:



شکل ۴: خودهمبستگی وقتی پنجره همبستگی کاملاً روی GI منطبق باشد.

حداکثر همبستگی در $n = \theta$ رخ می‌دهد که θ بیانگر آفست زمانی است.

۳-۱- سنجه‌ها

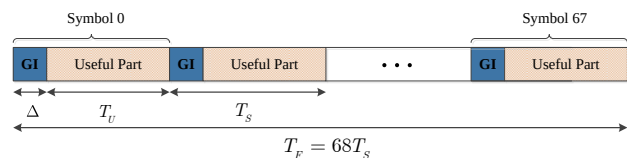
سیگنال همبسته ساز وارد بلوک سنجه‌ها می‌شود که پردازش اضافی روی این سیگنال انجام می‌دهند که نتیجه آن تولید همزمان ساز مقاوم می‌باشد. این سنجه‌ها عبارتند از:

- بیشینه همبستگی (MC)
- بیشینه همبستگی نرمالیزه (MNC)
- حداقل میانگین مربع خطا (MMSE)
- بیشترین درست‌نمایی (ML)

که در دوره T_s ارسال می‌شود. یک سمبول شامل دو بخش است: یک بخش مفید با دوره T_u و یک دوره محافظ (GI) با طول Δ شامل گسترش متناوب بخش مفید بوده و قبل از آن اضافه می‌شود. علاوه بر داده‌های ارسالی هر سمبول OFDM شامل موارد زیر است:

- پایلوت‌های پراکنده
- پایلوت‌های پیوسته
- حامله‌ای TPS

پایلوت‌ها (حوزه فرکانس) برای تخمین کانال، مشخص کردن مود ارسال و دنبال کردن نویز فاز بکار برده می‌شوند. ساختار فریم OFDM در حوزه زمان در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار فریم OFDM

۳-۲- سیگنال‌های مرجع

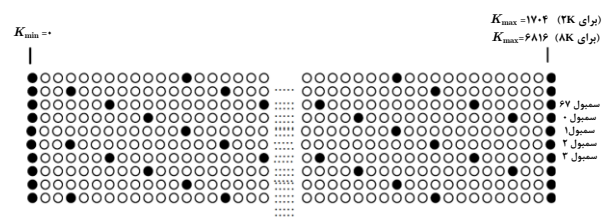
سیگنال‌های مرجع دارای سطح توان بالاتر بوده و به صورت پیوسته و پراکنده ارسال می‌شوند. تعداد حامل‌های مفید داده از یک سمبول به سمبول دیگر ثابت بوده و برای مود 2K برابر با ۱۵۱۲ و برای مود 8K برابر با ۶۰۴۸ حامل می‌باشد. مقادیر پایلوت‌های پیوسته و پراکنده از دنباله باینری شبه تصادفی $(PRBS^A)$ ، w_k ، تولید می‌شود. چندجمله‌ای مولد PRBS به صورت زیر داده می‌شود:

$$X^{11} + X^2 + 1 \quad (1)$$

مدولاسیون متناظر سمبول‌های پایلوت به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Re}\{c_{m,l,k}\} &= 4/3 \times 2(1/2 - w_k) \\ \text{Im}\{c_{m,l,k}\} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن m اندیس فریم، k اندیس فرکانس حامل و l اندیس زمانی سمبول است. پایلوت‌های پراکنده در موقعیت‌های $k = K_{\min} + 3 \times (l \bmod 4) + 12p$ ، $p \in [0, K_{\max} - K_{\min}]$ قرار داده می‌شوند. الگوی جاگذاری پایلوت‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: الگوی جاگذاری پایلوت‌ها (دایره‌های توخالی داده و دایره‌های توپر پایلوت‌ها)

$$T_{\text{Sam}} = \frac{1}{N_{\text{FFT}} \times \Delta f_{\text{Sub}}} \quad (19)$$

که در آن Δf_{Sub} پهنای باند یک زیرحامل و N_{FFT} تعداد زیرحامل‌ها است. اگر آفست فرکانسی را به فرکانس یک زیرحامل نرمالیزه نماییم،

یعنی:

$$\varepsilon = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_{\text{Sub}}} \quad (20)$$

در این صورت، در حالت کلی مثل این است که سیگنال گسسته در عبارت $e^{j2\pi\varepsilon\frac{n}{N_{\text{FFT}}}}$ ضرب شده است.

بنابراین سیگنال دریافتی (بدون در نظر گرفتن نویز و اثر کانال) به صورت زیر درخواهد آمد:

$$r[n] = s[n] e^{j2\pi\varepsilon\frac{n}{N_{\text{FFT}}}} \quad (21)$$

حال با استفاده از رابطه (۳) به عبارت زیر می‌رسیم:

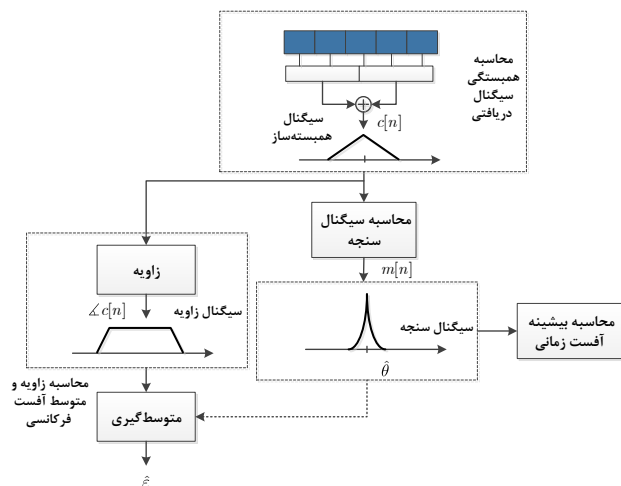
$$c[\theta] = e^{j2\pi\varepsilon} \sum_{i=0}^{L_g-1} |r[\theta+i]|^2 \quad (22)$$

۴-۱- تخمین آفست فرکانسی کسری

با استفاده از روابط فوق، برای تخمین آفست فرکانسی کسری می‌توان از خودهمبستگی به صورت زیر استفاده کرد:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \arg c[\hat{\theta}] \quad (23)$$

بلوک دیاگرام این روش در شکل ۸ آمده است:



شکل ۸: بلوک دیاگرام تخمین آفست فرکانسی کسری

۴-۲- تخمین آفست فرکانسی صحیح

۴-۲-۱- الگوریتم پایلوت‌های متوالی

با توجه به وجود حامل‌های پایلوت در استاندارد DVB، می‌توان از آن‌ها برای تخمین آفست فرکانسی صحیح بهره برد. در اینجا به جای خودهمبستگی از همبستگی متقابل استفاده می‌شود. تخمین آفست

$$M[\theta] = \rho M_{GI}[\theta] + (1 - \rho) M_p[\theta] \quad (14)$$

که سنج M_{GI} همان سنج ML داده شده در رابطه (۸) می‌باشد و سنج M_p توسط دو تابع همبستگی متقابل زیر به دست می‌آید:

$$M_p[\theta] = (1 + \rho) \cdot S_1 - \rho S_2 \quad (15)$$

که در آن

$$S_1 = \left| \sum_n r^*[n] \cdot d_c[n - \theta] \right| \quad (16)$$

$$S_2 = \left| \sum_{n=\theta}^{\theta+L_g-1} (r[n] + r[n+N])^* \cdot d_c[n - \theta] \right| \quad (17)$$

از معادلات فوق مشخص است که برای مقادیر زیاد SNR (ρ نزدیک ۱)، M برابر با سنج ML خواهد بود. ولی برای SNR های کم، M_p غالب خواهد بود.

این معیار دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد بوده که شامل محاسبه سنج ML و نیز محاسبه دو عبارت همبستگی متقابل می‌باشد. در عین حال، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های دیگر بررسی شده در سناریو مورد مطالعه دارای عملکرد ضعیف‌تری است. لذا این روش قابلیت به کارگیری در DVB را ندارد.

۳-۱-۵- سنج ارائه شده توسط Speth [۱۷]

در این مقاله مسئله هم‌زمان‌سازی سمبول، هم‌زمان‌سازی حامل و کلاک نمونه‌برداری و نیز تخمین کانال در قالب طراحی گیرنده بهینه برای سامانه‌های ارسال پهن‌بند DVB-T که مبتنی بر OFDM هستند مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش هم‌زمان‌سازی زمانی غیردقیق در رابطه (۵) مرجع فوق ارائه شده که همان روش MC ارائه شده در بخش ۳-۱-۱ می‌باشد. البته غیر از این روش، روش دیگری نیز مطرح شده است. این روش از سنج‌های استفاده می‌کند که به صورت زیر قابل فرموله شدن است:

$$\hat{\theta}_{\text{Speth}} = \arg \max_{i \in \{N_{\text{FFT}}-1, N_{\text{FFT}}, N_{\text{FFT}}+1\}} \max_n (|c[n, i]|) \quad (18)$$

در بخش شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، نتایج این روش را نیز مورد بررسی و مقایسه با سایر روش‌ها قرار خواهیم داد.

۴- تخمین آفست فرکانس حامل

اگر یک آفست فرکانسی به میزان Δf_c وجود داشته باشد همانند آن است که سیگنال دریافتی در عبارت $e^{j2\pi\Delta f_c t}$ ضرب شده باشد. در نمایش سیگنال‌ها به صورت گسسته مانند آن است که سیگنال در $e^{j2\pi\Delta f_c n T_{\text{Sam}}}$ ضرب شده است که در آن T_{Sam} زمان نمونه‌برداری است. می‌دانیم که:

۵- شبیه‌سازی‌های کامپیوتری

در این بخش ابتدا کانال‌های مورد بررسی که شامل کانال محوشدگی چندمسیره است معرفی می‌شوند. سپس پارامترهای بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها و نهایتاً نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌گردد. انتشار چندمسیره در یک سناریوی رادیویی، می‌تواند ناشی از مسیر مستقیم، محوشدگی، انعکاس، انکسار، پخش و پدیده سایه باشد.

۵-۱- مدل‌های کانال محوشوندگی چندمسیره

دو مدل برای کانال با محوشدگی چندمسیره در نظر گرفته شده است که با عنوان مدل en-route و مدل ورود^۹ شناخته می‌شوند. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی کانال که به راحتی در کامپیوترهای دیجیتال و سخت‌افزارها بکار می‌روند، مناسب هستند و لذا برای راست‌آزمایی لینک‌های هوایی دیجیتال بکار برده می‌شوند [۱۸]. کانال چندمسیره در مدل en-route دارای یک مسیر مستقیم و یک دسته مسیر تأخیریافته و منعکس شده می‌باشد. لذا کانال به صورت دومسیره مدل می‌شود. بر اساس [۱۹] و [۲۰]، مسیر مستقیم به صورت یک فرایند ثابت و مؤلفه کانال پخشی به صورت یک فرایند ریلی مدل می‌شود. مؤلفه‌های پخشی معمولاً دارای توزیع ایزوتروپیک نیستند و پهنای باند مؤلفه‌ها کمتر از ۳۶۰ درجه است. در مرجع [۲۰] پهنای باند ۳/۵ درجه محاسبه شده است. سایر پارامترهای این مدل در جدول ۱ آمده است.

مدل کانال دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، مدل ورود است. در این مدل، طیف توان تأخیر به جای دومسیره به صورت نمایی کاهشی می‌باشد و پهنای باند مؤلفه‌های پخشی ۱۸۰ درجه می‌باشد. سایر پارامترهای این مدل در جدول ۱ آمده است. برای شبیه‌سازی مسیرهای محوشدگی با فرکانس داپلر و زاویه ورود مشخص از روش ارائه شده در مرجع [۲۱] استفاده شده است. سایر پارامترهای بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای کانال در سناریوهای en-route و ورود

Arrival scenario	En-Route scenario	
۸۵ m/s	۱۰۰۰ Km/h (۲۷۸ m/s)	سرعت فرستنده
۷ μsec	۳۲ μsec	حداکثر گسترش تأخیر کانال ($\tau_{\max}$)
۱۰	۱۰	فاکتور رایس (K_{Rice} [dB])
۱	۱	فاکتور $f_{D_{\text{Los}}} / f_{D_{\text{max}}}$
-۹۰/۰	۱۷۸/۲۵	زاویه شروع پرتو φ_{a_L}
+۹۰/۰	۱۸۱/۷۵	زاویه پایان پرتو φ_{a_H}
نمایی (۱۰ نمونه با فاصله یکسان)	دومسیره	مدل تأخیر (نمایی یا دومسیره)
10^{-6}	-	زمان شیب (τ_{slope}) [s]

فرکانسی صحیح بر اساس محاسبه قدرمطلق همبستگی بین زیرحامل‌های پایلوت یک سمبول OFDM و سمبول OFDM قبلی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M[l] = \left| \sum_{k \in S} c_{m,k+l} \cdot c_{m-1,k+l}^* \right| \quad (24)$$

که در آن $c_{m,k}$ ، k امین زیر حامل m امین سمبول دریافتی، l شیفت حامل و S مجموعه اندیس‌های حامل‌های پایلوت می‌باشد. آفست زمانی منجر به تولید آفست فاز در حوزه فرکانس می‌شود. لذا این سنجه حساس به آفست‌های زمانی کوچک می‌باشد. برای حل این مشکل روش‌های دیگری قابل استفاده است که در ادامه ذکر می‌شوند.

۴-۲-۲- الگوریتم توان پایلوت‌های متوالی

برای مرتفع کردن مشکل الگوریتم قبل که به آفست زمانی حساس است، از الگوریتم زیر استفاده می‌شود که مشکل فوق را حل کرده است. در این الگوریتم از سنجه زیر استفاده می‌شود:

$$M[l] = \sum_{k \in S} |c_{m,k+l} \cdot c_{m-1,k+l}^*| \quad (25)$$

۴-۲-۳- الگوریتم مربع توان پایلوت‌های متوالی

برای کاهش پیچیدگی، این الگوریتم از مجذور مقدار اندازه استفاده می‌کند. در این الگوریتم از سنجه زیر استفاده می‌شود:

$$M[l] = \sum_{k \in S} |c_{m,k+l} \cdot c_{m-1,k+l}^*|^2 \quad (26)$$

۴-۲-۴- الگوریتم دامنه پایلوت‌ها

در این الگوریتم از همبستگی متقابل به جای خودهمبستگی استفاده می‌شود. این الگوریتم از همبستگی متقابل حامل‌های دریافتی با حامل‌های پایلوت ذخیره شده در گیرنده که در معرض ISI و آفست زمانی نیستند، استفاده می‌کند. سنجه مورد استفاده به صورت زیر است:

$$M[l] = \sum_{k \in S} |c_{m,k+l} \cdot p_k^*| \quad (27)$$

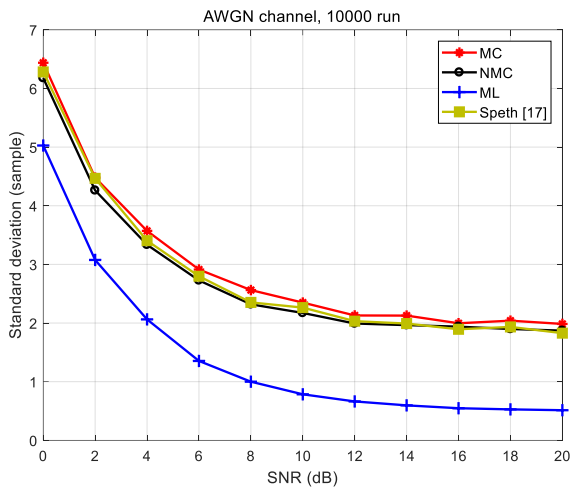
با توجه به اینکه مدولاسیون پایلوت‌ها با استفاده از PRBS انجام می‌شود، مقادیر p_k یکسان بوده و در DVB مقادیر 4/3 و -4/3 می‌گیرند. با توجه به ثابت بودن اندازه پایلوت‌ها، به جای سنجه فوق می‌توان از سنجه زیر استفاده کرد:

$$M[l] = \sum_{k \in S} |c_{m,k+l}| \quad (28)$$

۴-۲-۵- الگوریتم توان پایلوت‌ها

نهایتاً، با مربع‌گیری عبارت داخل مجموع می‌توان پیچیدگی را کم کرد و از سنجه زیر استفاده کرد:

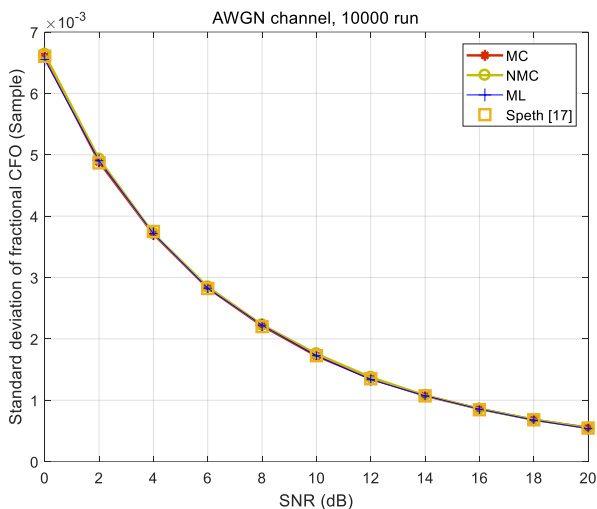
$$M[l] = \sum_{k \in S} |c_{m,k+l}|^2 \quad (29)$$



شکل ۱۰: انحراف معیار $|\theta - \hat{\theta}|$ برای کانال AWGN

۵-۲-۲- ارزیابی همزمان سازی فرکانسی

انحراف معیار تخمین آفست فرکانسی کسری $(\varepsilon_f - \hat{\varepsilon}_f)$ برای SNRهای مختلف برای سه معیار MC، MNC و ML در کانال AWGN در شکل ۱۱ رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، هر سه معیار عملکرد مشابهی از خود نشان می دهند.



شکل ۱۱: انحراف معیار خطای تخمین گر $|\varepsilon_f - \hat{\varepsilon}_f|$ در کانال AWGN

نتایج شبیه سازی نشان می دهد توسط سنجهای معرفی شده، تخمین آفست فرکانسی صحیح به صورت دقیق و بدون خطا انجام می شود. نکته قابل ذکر این است که خطای همزمان سازی زمانی در تخمین آفست فرکانسی کسری و صحیح لحاظ شده است. به عبارت دیگر نتایج تخمین آفست فرکانسی با وجود خطای ناشی از تخمین زمانی سیگنال ارائه شده است.

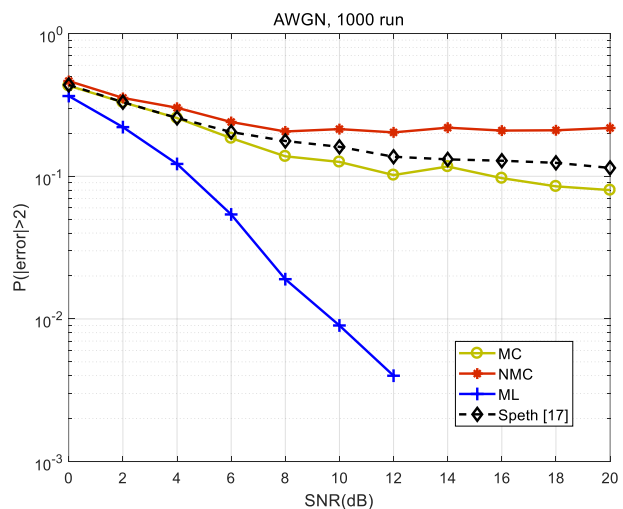
جدول ۲: پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی های کامپیوتری

پارامتر	مقدار
طول FFT	۱۰۲۴
طول GI	۱۲۸
دوره زمانی GI	۶۴ μ sec
دوره مفید سمبول OFDM	۵۱۲ μ sec
دوره سمبول OFDM	۵۷۶ μ sec
تعداد حامل های مفید	۸۰۳
تعداد حامل های فعال	۹۰۳
حداکثر آفست فرکانسی	۱۶۰۰ Hz (± 2 PPM)
سرعت نسبی فرستنده و گیرنده	۱۰۰۰ Km/h
حداکثر خطای همزمان سازی زمانی بر حسب نمونه (برای محاسبه احتمال هشدار غلط)	$(CP - \text{maximum channel spread}) \div 2 = 32$
اندیس مدولاسیون	۱۶ (۱۶-QAM)
نرخ up-sampling	۱

۵-۲- نتایج شبیه سازی در کانال AWGN

۵-۲-۱- ارزیابی همزمان سازی زمانی

در شکل ۹ سه معیار MC، MNC و ML در کانال AWGN مورد ارزیابی قرار گرفته اند. این شکل احتمال آفست زمانی بیش از ۲ نمونه $(|\theta - \hat{\theta}| > 2)$ را نشان می دهد. با استفاده از معیار ML احتمال به صورت نمایی با افزایش SNR افت می کند اما در معیارهای MC و MNC چنین نیست. برای معیار ML برای SNR بیشتر از ۱۴ دسی بل هیچ خطایی در ۱۰۰۰ بار شبیه سازی رخ نمی دهد لذا احتمال خطا زیر 10^{-3} است. در نتیجه معیار ML عملکرد بهتری نسبت به معیارهای MC و MNC از خود نشان می دهد. انحراف معیار خطای تخمین برای کانال AWGN در شکل ۱۰ نشان داده شده است که مجدداً عملکرد بهتر روش ML را نسبت به سایر روش ها نشان می دهد.



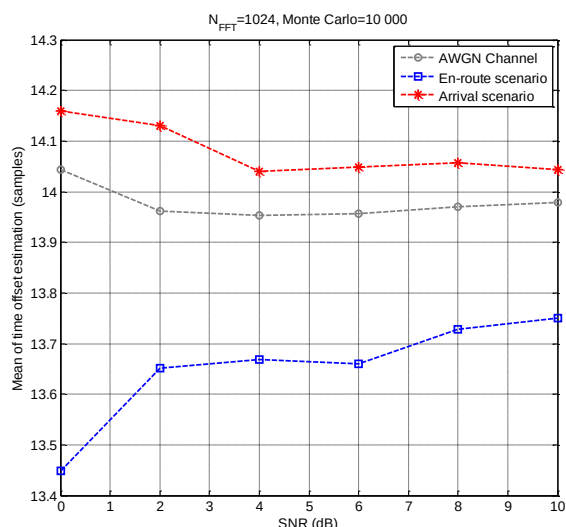
شکل ۹: احتمال $(|\theta - \hat{\theta}| > 2)$ برای کانال AWGN

۵-۳- نتایج شبیه‌سازی در کانال محوشدگی چندمسیره

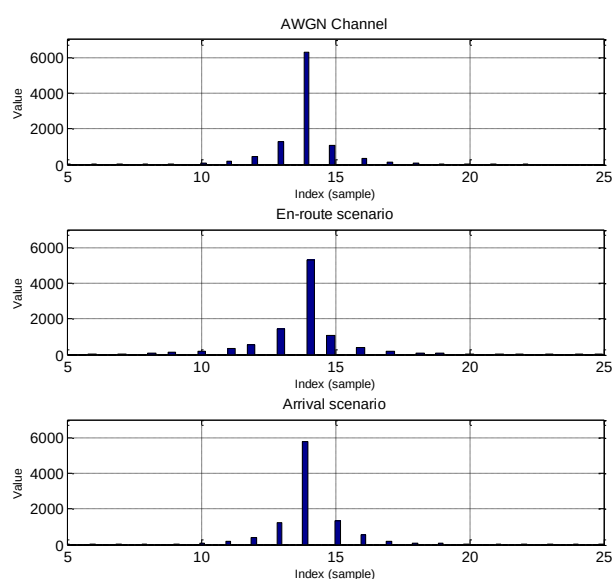
۵-۳-۱- ارزیابی همزمان‌سازی زمانی

همان‌گونه که در بخش قبل نشان داده شد، در بین تمامی الگوریتم‌هایی که دارای سرآغاز نیستند و از داده‌های آموزشی استفاده نمی‌کنند (الگوریتم‌های بکار رفته در DVB)، بهترین عملکرد در کانال AWGN مربوط به استفاده از سنجه ML است. لذا در ادامه به بررسی عملکرد این روش در کانال‌های دارای محوشدگی چندمسیره می‌پردازیم. به‌طور مشخص می‌خواهیم میزان افت عملکرد این روش را در چنین کانال‌هایی مورد ارزیابی قرار دهیم.

شکل ۱۲ انحراف معیار تخمین آفست زمانی برحسب SNR را برای سه کانال مورد بررسی نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌شده، متوسط ۱۰۰۰۰ بار اجرای شبیه‌سازی است. توجه شود که در اجرای این الگوریتم آفست فرکانس حامل نیز لحاظ شده است.



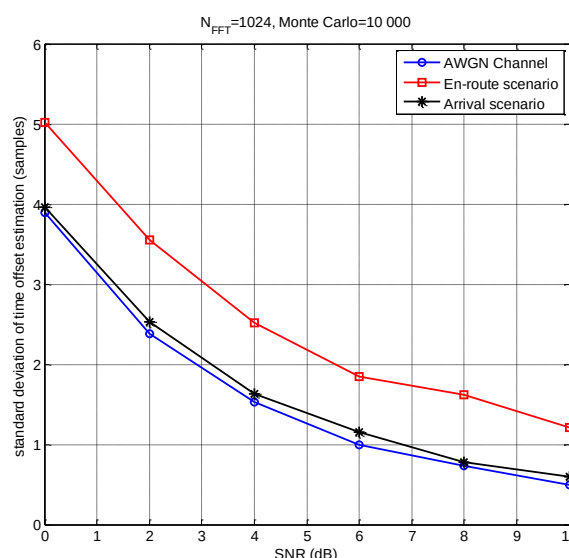
شکل ۱۲: میانگین تخمین آفست زمانی برحسب SNR برای سه کانال مورد بررسی



شکل ۱۴: هیستوگرام تخمین آفست زمانی برای سه کانال مورد بررسی در SNR = ۵ dB برای ۱۰۰۰۰ بار انجام شبیه‌سازی

۵-۳-۲- ارزیابی همزمان‌سازی فرکانسی

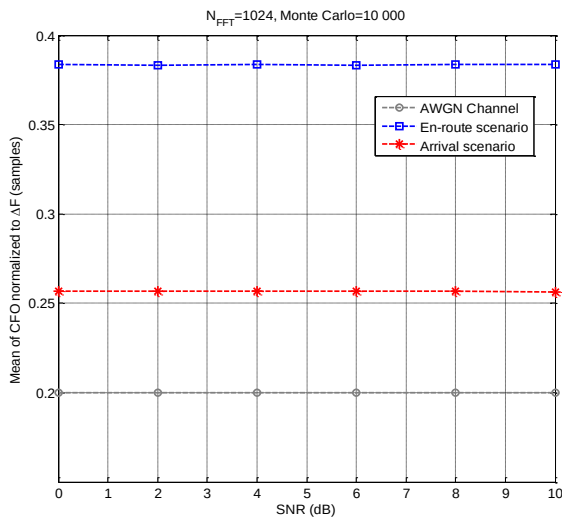
در ادامه به بررسی عملکرد تخمین آفست فرکانس حامل در سه کانال مورد بررسی می‌پردازیم. انحراف معیار و میانگین تخمین در سه کانال به‌ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آمده است. نتایج نشان داده‌شده، متوسط ۱۰۰۰۰ بار اجرای شبیه‌سازی است. نکته قابل ذکر این است که در منحنی فوق اختلاف مقدار میانگین CFO برای SNR های مختلف (از جمله SNR = ۰ dB) در هر سه کانال مورد بررسی، زیر یک هرتز می‌باشد. همچنین در کانال‌های چندمسیره که مسیرهای مختلف



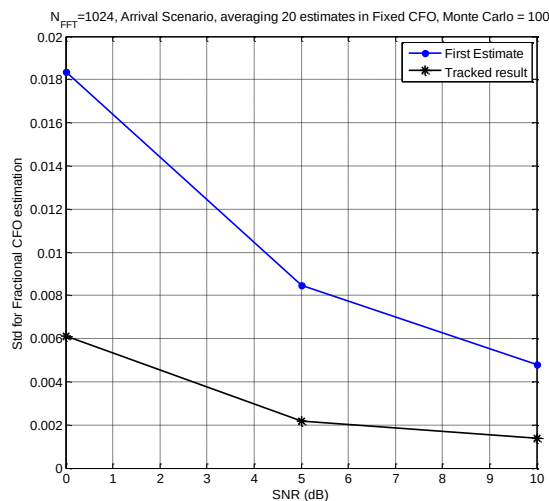
شکل ۱۳: انحراف معیار تخمین آفست زمانی برحسب SNR برای سه کانال مورد بررسی

شکل ۱۳ میانگین تخمین آفست زمانی برحسب SNR را برای سه کانال مورد بررسی نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌شده، متوسط ۱۰۰۰۰ بار اجرای شبیه‌سازی است. در شکل ۱۴ هیستوگرام تخمین آفست زمانی برای سه کانال مورد بررسی در SNR = ۵ dB ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، روش انتخابی حتی در کانال محوشدگی چندمسیره نیز عملکرد قابل‌قبولی از خود نشان می‌دهد (آفست زمانی واقعی $\theta = 14^\circ$ در نظر گرفته شده است). در ادامه احتمال عدم آشکارسازی^{۱۰} و نیز احتمال هشدار غلط^{۱۱} برحسب آستانه سنجه زمانی در همزمان‌سازی زمانی با استفاده از الگوریتم ML برای سه کانال مورد بررسی و برای حالت‌هایی که آفست فرکانس حامل حداکثر است مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تنها برای کانال en-route در شکل ۱۵ ارائه شده است. نتایج مشابهی را

استفاده از رهگیری تغییرات آن دنبال گردد. در ادامه به‌منظور اختصار تنها نتایج هر سناریو برای یک کانال ارائه شده است.



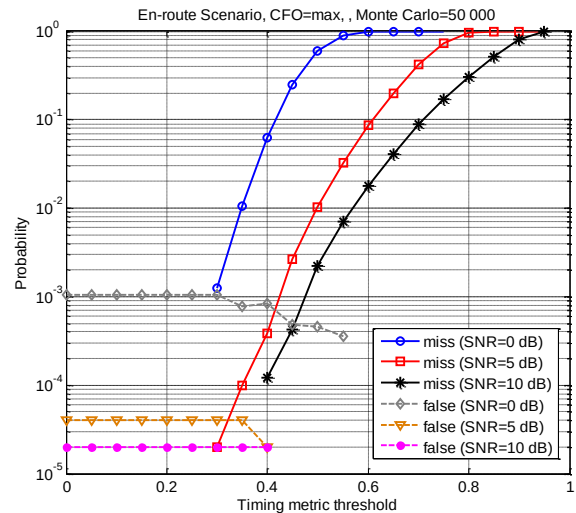
شکل ۱۷: میانگین تخمین آفست فرکانس حامل بر حسب SNR برای سه کانال مورد بررسی



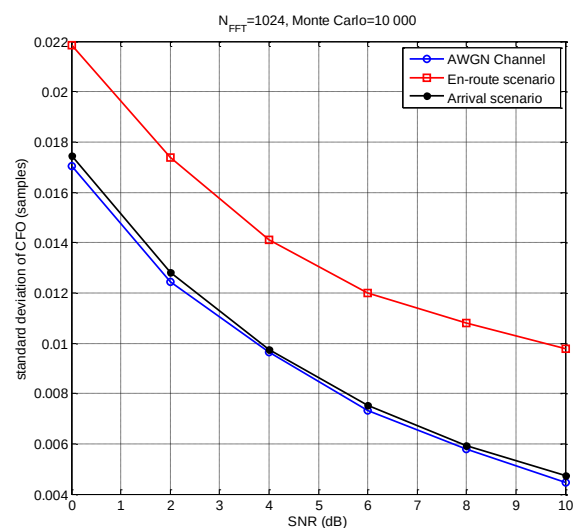
شکل ۱۸: انحراف معیار تخمین اولیه و متوسط گیری شده آفست فرکانس حامل بر حسب SNR برای سناریوی ورود و برای CFO ثابت

نتایج مشابهی برای سایر کانال‌ها به‌دست آمده است که از ذکر آن خودداری می‌گردد. شکل ۱۸ سناریوی CFO ثابت را برای کانال ورود نشان می‌دهد که در آن با متوسط‌گیری ۲۰ تخمین متوالی، دقت تخمین به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. برای مثال در $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ انحراف معیار تخمین CFO کسری متوسط‌گیری شده $\frac{1}{3}$ مقدار اولیه است. شکل ۱۹ نیز حالت CFO متغیر که به‌صورت خطی تغییر می‌کند را برای کانال en-route در $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر CFO تخمین زده‌شده، نتایج فیلترشده تخمین‌ها نیز نشان داده شده است. در واقع برای هموارسازی مقادیر تخمینی و جلوگیری از تغییرات ناگهانی، تخمین‌های به‌دست‌آمده از

CFO های متفاوتی دارند، نتایج فوق نشان می‌دهد که تخمین‌گر، CFO مسیر اصلی (LOS) را دنبال می‌کند.



شکل ۱۵: احتمال عدم آشکارسازی و هشدار غلط بر حسب آستانه سنج زمانی در سناریوی en-route با حداکثر آفست فرکانس حامل ممکن



شکل ۱۶: انحراف معیار تخمین آفست فرکانس حامل بر حسب SNR برای سه کانال مورد بررسی

۴-۵- رهگیری^{۱۲}

نظر به اینکه تغییر شرایط محیطی از جمله تغییر دما، رطوبت و فشار می‌تواند باعث تغییر آفست فرکانس حامل با گذر زمان شود، لذا در این بخش امکان رهگیری این تغییرات مدنظر قرار گرفته است. بررسی عملکرد رهگیری تخمین آفست فرکانس حامل در دو سناریو و سه کانال مورد مطالعه قرار گرفته است. در سناریوی اول CFO ثابت بوده و با رهگیری و متوسط گیری تخمین‌های متوالی، دقت تخمین افزایش می‌یابد. در سناریوی دوم CFO متغیر می‌باشد و انتظار می‌رود با

قالب همزمان ساز می‌شوند. شایان ذکر است که ساعت قالب‌های پردازشگر چندین برابر نرخ دریافت نمونه‌های داده می‌باشند که به ما اجازه می‌دهد سخت‌افزار لازم برای عملیات پردازشی را به همان نسبت کاهش دهیم.

۶-۱- پیچیدگی محاسباتی الگوریتم تخمین آفست زمانی

- برای محاسبه تخمین توان نیاز به دو ضرب حقیقی و یک جمع و یک تفریق حقیقی داریم.
- برای محاسبه خودبستگی نیاز به یک ضرب مختلط و یک جمع و یک تفریق مختلط داریم.
- برای محاسبه سنجه ML نیاز به یک ضرب حقیقی و یک جمع حقیقی داریم.
- در نهایت یک مقایسه (تفریق) برای به‌دست آوردن بهترین سنجه نیاز است.

۶-۲- پیچیدگی محاسباتی الگوریتم تخمین آفست فرکانسی

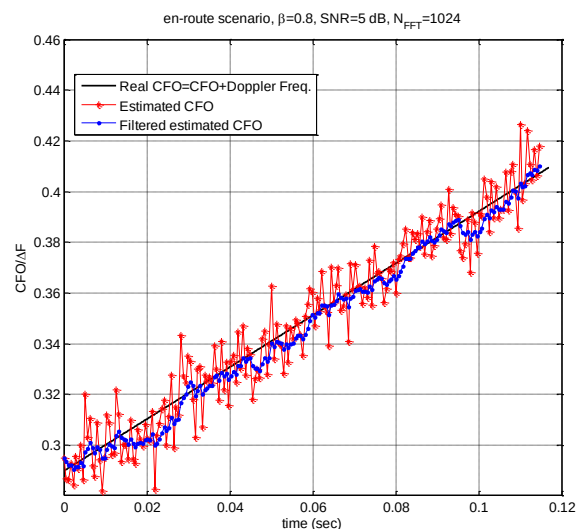
با توجه به این‌که در تخمین آفست فرکانسی از مقدار خودبستگی محاسبه‌شده در تخمین آفست زمانی استفاده می‌شود، هیچ‌گونه ضرب و جمعی در اینجا نیاز نیست و فقط لازم است که فاز عدد مختلط به‌دست‌آمده محاسبه شود (یک‌بار در هر سمبل OFDM) که معمولاً با استفاده از CORDIC انجام می‌شود.

در صورت نیاز به متوسط‌گیری یا فیلتر کردن تخمین‌ها (مثلاً برای رهگیری آفست فرکانسی) حداکثر با یک جمع و تفریق ساده این کار انجام می‌شود (یک‌بار در هر سمبل OFDM).

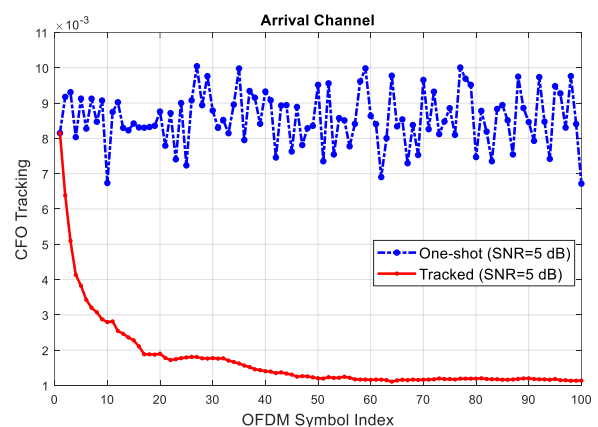
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله تخمین همزمان آفست زمانی و آفست فرکانس حامل در سامانه‌های مخابراتی که مبتنی بر استاندارد DVB بوده و از مدولاسیون OFDM استفاده می‌کنند، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. از آنجا که در استاندارد DVB (برخلاف استانداردهایی همچون IEEE 802.11) از دنباله آموزشی یا سرآغاز استفاده نمی‌شود، لذا بایستی از الگوریتم‌هایی برای حل مسئله فوق‌الذکر استفاده کرد که مبتنی بر استفاده از سرآغاز نیستند. روش‌های مختلف ارائه‌شده در مراجع با این ویژگی در این مقاله مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و روش با بهترین عملکرد در کانال AWGN انتخاب گردید. سپس عملکرد روش انتخابی در کانال واقعی‌تر محوشدگی چندمسیره با شبیه‌سازی کامپیوتری مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی‌های انجام‌گرفته علاوه بر میانگین و انحراف معیار تخمین آفست زمانی و CFO، احتمال عدم آشکارسازی، احتمال هشدار غلط و نیز امکان رهگیری تغییرات CFO با گذشت زمان، به‌منظور بررسی دقیق روش انتخابی از لحاظ کاربردی بودن، مورد بررسی قرار گرفت که همگی مؤید عملکرد مناسب روش انتخابی در عمل می‌باشد.

یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۱۹ مشخص است، با استفاده از رهگیری، تغییرات CFO دنبال می‌گردد. همچنین عملکرد رهگیری آفست فرکانس حامل برای CFO متغیر و مقایسه آن با تخمین‌های مبتنی بر هر یک از سمبول‌های OFDM برای سناریوی ورود در $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ در شکل ۲۰ ارائه شده است.



شکل ۱۹: مقدار واقعی و رهگیری شده و نیز تخمین‌های فیلتر شده برحسب زمان برای CFO متغیر در سناریوی en-route برای $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$.



شکل ۲۰: عملکرد رهگیری آفست فرکانس حامل برای CFO متغیر در سناریوی ورود برای $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$.

۶- پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌ها

برای پیچیدگی محاسباتی، تعداد عملیات جمع و ضرب موردنیاز در هر الگوریتم را برای یک نمونه داده که از سیگنال دریافتی نمونه‌برداری شده است، ارائه می‌کنیم. نمونه داده‌ها از شاخه I و Q نمونه‌بردار آمده‌اند و پس از فیلترینگ‌های لازم برای عملیات همزمان‌سازی به صورت اعداد مختلط نقطه‌ثابت^{۱۲} می‌باشند که با نرخ ۲ Msps وارد قالب

مراجع

- [10] Y. Li, Y. Wang and X. Guan, "Joint synchronization and Doppler scale estimation using zadoff-chu sequences for underwater acoustic communications," *OCEANS 2017 – Anchorage*, Anchorage, AK, USA, pp. 1-5, 2017.
- [11] P. Singh and K. Vasudevan, "Preamble-based synchronization for OFDM/OQAM systems in AWGN channel," *2017 4th Int. Conf. on Signal Proces. and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, pp. 60-65, 2017.
- [12] R. V. Ssenyuva, G. K. Kurt and E. Anarim, "Compressed sensing technique for synchronization and channel estimation in OFDMA uplink transmissions," *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Kos, pp. 2611-2615, 2017.
- [13] T. Keller, L. Piazzo, P. Mandarini, L. Hanzo, "Orthogonal frequency division multiplex synchronization techniques for frequency-selective fading channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, pp. 999-1008, 2001.
- [14] T.M. Schmidl, D.C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, 1997.
- [15] J.-J. v. d. Beek, M. Sandell, P.O. Brjesson, *ML Estimation of Timing and Frequency Offset in Multicarrier Systems*, Div. of Signal Processing, Lulea Univ. of Tech., 1996.
- [16] D. Landstrom, S.K. Wilson, J.-J. v. d. Beek, P. Odling, P.O. Borjesson, "Symbol time offset estimation in coherent OFDM systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no.4, pp. 545-549, 2002.
- [17] M. Speth, S. Fechtel, G. Fock, and H. Meyr, "Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission-Part II: A case study," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 49, no. 4, pp. 571-578, 2001.
- [18] E. Haas, "Aeronautical channel modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 51, no. 2, pp.254-264, 2002.
- [19] A. Neul et al., "Propagation measurements for the aeronautical satellite channel," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 90-97, 1987.
- [20] S. M. Elnoubi, "A simplified stochastic model for the aeronautical mobile radio channel," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 960-963, 1992.
- [21] C. Xiao, Y. R. Zheng, and N. C. Beaulieu, "Novel sum-of-sinusoids simulation models for Rayleigh and Rician fading channels" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 12, pp. 3667-3679, 2006.
- [1] A. Sani, M. Mohassel Feghhi and A. Abbasfar, "Discrete bit loading and power allocation for OFDMA downlink with minimum rate guarantee for users", *Elsevier AEUE International Journal of Electronics and Communications*, vol. 68, no. 7, pp. 602-610, 2014.
- [2] S. Weinstein and P. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform," *IEEE Trans. Commun. Tech.*, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, 1971.
- [3] J. Wu, C. Yun, X. Zeng and H. Min, "Robust Timing and Frequency Synchronization Scheme for DTMB System," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.53, no.4, pp.1348-1352, 2007.
- [4] R. P. F. Hoefel, "IEEE 802.11ax: A study on techniques to mitigate the frequency offset in the uplink multi-user MIMO," *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Medellin, pp. 1-6, 2016.
- [5] M. Benzarti, M. Messaoudi and S. Hasnaoui, "WiMAX timing and frequency synchronization based on training sequence," *2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN)*, Sousse, pp. 1-7, 2015.
- [6] IEEE 802.11a-1999 (8802-11:1999/Amd 1:2000(E)) IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.
- [7] Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television, EN 300 744 v 1.5.1, 2004.
- [8] H Minn, VK Bhargava, KB Letaief, "A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 4, 822-839, 2003.
- [9] D.C. Seung, M.C. Jung, and H.L. Jae, "An Initial Timing Offset Estimation Method for OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel", *IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, 2006.

زیر نویس ها

- ¹ Multi-Carrier
- ² Integrated Services Digital Broadcast-Terrestrial
- ³ Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting
- ⁴ Digital Video Broadcasting-Terrestrial
- ⁵ Training sequence
- ⁶ Preamble
- ⁷ Guard Interval
- ⁸ Psuadu Random Binary Sequence
- ⁹ Arrival
- ¹⁰ Miss detection
- ¹¹ False Alarm
- ¹² Tracking
- ¹³ Fixed Point