نشریه علمی- ترویجی محاسبات نرم
شمارهٔ هفتم/ بهار و تابستان ۹۴/ صفحهٔ ۴۲ـ۵۵

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۴
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱۶

ارزیابی سیاست‌های زمان‌بندی در نسل چهارم شبکه‌های سلولی (LTE)

فاطمه جهانشاهی جواران[۱]، مهدیه قزوینی*[۲و۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی کرمان، کرمان، ایران
Fateme_jahanshahii@yahoo.com
[۲] استادیار بخش مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
[۳]باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بافت، دانشگاه آزاد اسلامی، بافت، ایران
Mghazvini@uk.ac.ir

چکیده: نسل جدید شبکه‌های بی‌سیم مانند Wimax و LTE (Long Term Evolution) از سرویس‌هایی که مصرف منبع بالایی دارند (مانند VOIP، ویدئو کنفرانس، پخش ویدئو دیجیتال و جریان‌های چندرسانه‌ای) پشتیبانی می‌کنند. افزودن سرویس‌های چندرسانه‌ای در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم، چالش جدیدی را در تخصیص منابع رادیویی به‌وجود آورده است. به‌علت وجود حجم عظیمی از جریان‌های ترافیکی بالا در جهت پایین‌سو (Downlink)، نیاز به تخصیص مؤثر منابع در این جهت بسیار مهم‌تر از جهت بالاسو (Uplink) می‌باشد. در یک سیستم LTE سرویس‌های مختلف نیازمندی‌های کیفیت خدمات متفاوتی نیز دارند. در این مقاله سعی بر آن است که سیاست‌های زمان‌بندی مختلفی که تا به امروز برای سرویس‌های زمان واقعی (Real time) و غیر زمان واقعی (Non-Real time) با درنظرگرفتن کیفیت خدمات در این شبکه‌ها مطرح شده‌اند، براساس سه پارامتر توان عملیاتی، تخصیص عادلانه و نرخ از دست رفتن بسته و تأخیر مورد ارزیابی قرار گیرند. این ارزیابی با استفاده از شبیه‌سازی و مقایسهٔ این پارامترها در الگوریتم‌های زمان‌بندی طی یک جریان ترافیکی ویدئویی به‌عنوان یک سرویس زمان واقعی و یک جریان ترافیکی وب به‌عنوان یک سرویس غیر زمان واقعی انجام خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های LTE، الگوریتم‌های زمان‌بندی، کیفیت سرویس، پایین‌سو، بالاسو، سرویس‌های زمان واقعی (RT) و غیر زمان واقعی(NRT).

۱. مقدمه

مخابرات بی‌سیم در سال ۱۸۹۷ با اختراع تلگراف بی‌سیم توسط مارکونی آغاز شد و اکنون پس از گذشت بیش از یک قرن، چهارمین نسل از سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم پا به عرصه گذاشته است. ایدهٔ شبکه‌های سلولی در سال ۱۹۴۷ توسط بل‌لبز از ISA به‌وجود آمد. این ایده با تقسیم ناحیهٔ تحت پوشش به سلول‌های کوچک که هر کدام ایستگاه کاری جداگانه‌ای داشته و در فرکانس متفاوت کار می‌کنند، این امکان را فراهم آورد که ظرفیت شبکه به‌طور چشمگیری افزایش یابد. رشد سیستم‌های تلفن سیار، افزایش کاربران اینترنت و بالا رفتن انتظارات و نیازهای کاربران، مانند تقاضای دسترسی به اینترنت بی‌سیم با کیفیت بالا منجر به طراحی سیستم‌هایی شده است که قادر به برآورده کردن این نیازها باشند. به همین منظور، شبکه‌های بی‌سیم به سرعت در حال تکامل و حرکت به‌سمت شبکه‌های تماماً IP می‌باشند. بنابراین حرکت به‌سمت استفاده از سوئیچ بسته‌ای و به تبع آن شبکه‌های IP امری طبیعی است. شبکه‌های نسل چهارم (4G)، نامی است که به سیستم‌های موبایل مبتنی بر IP که دسترسی را از طریق یک مجموعه از واسط‌های رادیویی تأمین می‌کنند، داده شده است. نام تجاری آن در 3GPP[1] به‌صورت LTE است.

زمان‌بندی در این شبکه‌ها که موضوع مورد بحث در این مقاله است، فرایند تصمیم‌گیری توسط زمان‌بند به‌منظور تخصیص منابع (زمان، فرکانس) بین کاربران در یک سیستم ارتباطی است. در LTE فرایند زمان‌بندی در ایستگاه اصلی (eNobeB)[2] انجام می‌گیرد. برای این منظور از زمان‌بندی پویا استفاده می‌شود که برای تخصیص منابع مختلف به کاربران تحت پوشش تصمیم‌گیری می‌کند. همچنین پارامترهایی مثل توان عملیاتی[3]، تخصیص عادلانهٔ منابع[4] و نرخ از دست رفتن بسته[5] مورد توجه قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه سرویس‌های متفاوت نیازمندی‌های QoS متفاوتی دارند، در شرایطی که سرویس‌های RT و NRT گوناگون در یک سیستم وجود دارد، به حداکثر رساندن توان عملیاتی یک سیستم در کنار تخصیص عادلانهٔ منابع، از چالش‌های مهم در طراحی الگوریتم‌های زمان‌بندی بسته است.

در ادامه، بخش دوم به معرفی LTE، مفاهیم و ویژگی‌های مربوط به آن‌ها می‌پردازد. در بخش سوم، مفاهیم مربوط به کیفیت سرویس در شبکه‌های LTE بیان می‌شوند. بخش چهارم به توضیح مفهوم زمان‌بندی و همچنین الگوریتم‌های زمان‌بندی پایین‌سوی استفاده‌شده در LTE می‌پردازد. در بخش پنجم، کارهای پیشین انجام شده در راستای زمان‌بندی شبکه‌های نسل چهارم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش ششم، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد روش‌های زمان‌بندی آمده است و در آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادها به‌منظور کارهای بعدی ارائه شده است.

۲. مفاهیم و ویژگی‌های شبکه‌های LTE

مهم‌ترین ویژگی برجستهٔ LTE این است که تمامی زیرساخت آن براساس IP است. به عبارت بهتر، بخش هستهٔ شبکه کاملاً همگام با پروتکل‌های TCP/IP است و از سیگنالینگ معمولی که در شبکه‌های قدیمی‌تر به‌خصوص GSM استفاده می‌شد، خبری نیست. حداکثر نرخ انتقال داده در این فناوری ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه برای بارگیری[6] و ۵۰ مگابیت بر ثانیه برای بارگذاری[7] در طیف فرکانسی ۲۰ مگاهرتز است. در شبکهٔ نسل سوم پیشرفته یا HSPA تأخیر در حدود ۴۰ تا ۵۰ میلی‌ثانیه است که در LTE به حدود ۱۰ میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد. از لحاظ تکنیکی، سرعت بارگذاری و بارگیری در LTE نسبت به نسل‌های قبل بسیار بیشتر است. البته علاوه بر نرخ دادهٔ بالا، تأخیر کمتر در ارسال بسته‌ها به کیفیت فوق‌العادهٔ VOIP، ویدئو کنفرانس و سایر بسته‌هایی که هم‌زمان در حال ارسال‌اند، منجر می‌شود.

1. 3rd Generation Partnership Project
2. Evolved NodeB
3. Throughput
4. Fairness Allocation
5. Packet loss rate
6. Download
7. Upload

در LTE ایستگاه اصلی eNodeB، ایستگاه متحرک MS[1] و تجهیزات کاربر UE[2] نامیده می‌شوند. انتقالی که از eNodeB به‌سمت UE انجام می‌گردد، پایین‌سو[3] و انتقال در جهت عکس آن بالاسو[4] نامیده می‌شود.

LTE از بسته‌هایی با نرخ ۳۰۰ مگابیت بر ثانیه پشتیبانی می‌کند که این نرخ داده با کمک آنتن دهی MIMO[5] و یک شبکهٔ رادیویی با تأخیر کمتر از ۵۰ مگابیت بر ثانیه به‌دست آمده است. علاوه بر این LTE در هر دو حالت تقسیم فرکانس (FDD)[6] و تقسیم زمانی (TDD)[7] کار می‌کند و می‌تواند در پهنای باندهای متفاوت به‌کار گرفته شود. در پیکربندی TDD، انتقالات بالاسو و پایین‌سو در یک باند فرکانسی اجرا می‌شوند، درحالی‌که در FDD، در باندهای فرکانسی متفاوت اجرا می‌شوند.

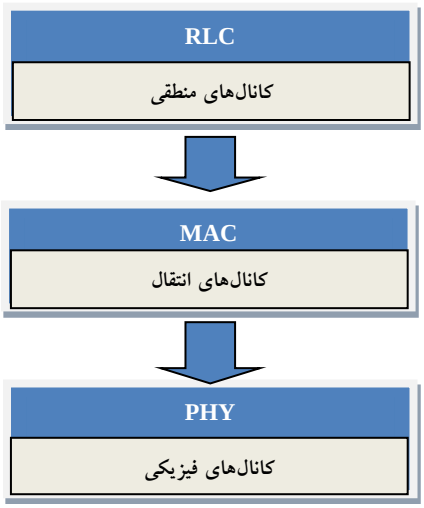
OFDM[8] به‌عنوان مدولاسیون مورد استفاده در پایین‌سو پذیرفته شده است [۱]. 3GPP برای انتقال بالاسو، مدولاسیون SC-OFDMA[9] را انتخاب کرده است. SC-OFDMA شکل تغییریافته‌ای از OFDMA است که دارای توان عملیاتی و پیچیدگی مشابه است. همانند SC-OFDMA، FDM[10] شامل زیرجریان‌هایی می‌باشد که این زیرجریان‌ها به‌صورت متوالی، توسط زیرحامل‌ها انتقال داده می‌شوند؛ این عمل از به‌وجودآمدن نوسان در سیگنال‌های SC-FDMA جلوگیری می‌کند.

LTE از یکسری منابع فیزیکی تشکیل شده است که توسط یک شبکه شامل چندین بلوک منبع (RB)[11] ارائه شده‌اند. بلوک‌های منبع شامل تعدادی از المان‌های شبکه (RE)[12] هستند. یکی از وظایف اصلی eNodeB زمان‌بندی است که توسط ماژول زمان‌بند انجام می‌شود. زمان‌بند موظف است منابع را به UEهای مختلفِ تحت پوشش eNodeB تخصیص دهد.

۱.۲. معماری پروتکل LTE

پروتکل LTE از سه لایهٔ اصلی که در شکل (۱) نشان داده شده است، تشکیل شده که توضیح داده می‌شوند.

لایهٔ RLC[13]: داده‌ها از لایهٔ همگرایی بسته داده (PDCP)[14] به لایهٔ کنترل پیوند رادیویی (RLC) انتقال داده می‌شوند و در بافر واحد دادهٔ خدمات (SDU)[15] ذخیره می‌شوند. RLC مسئول قطعه‌بندی یا الحاق داده‌های انتخاب‌شده از بافرِ SDU است. همچنین با توجه به تصمیم زمان‌بند RLC، واحد دادهٔ پروتکل (PDU)[16] را ایجاد می‌کند. به‌علاوه، مکانیسم ارسال مجدد توسط این لایه پشتیبانی می‌شود تا از تحویل داده‌های بدون خطا به لایهٔ بالاتر اطمینان حاصل شود [۲].



لایهٔ MAC[17]: لایهٔ کنترل دسترسی به رسانه (MAC) خدماتی را از طریق کانال‌های منطقی به لایهٔ RLC ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، کانال‌های منطقی به دو دسته کانال‌های کنترل و دیتا تقسیم‌بندی می‌شوند که اطلاعات پیکربندی و کنترل از طریق کانال‌های کنترل و داده‌های پایانه‌ها از طریق

1. Mobile Stiation
2. User Equipment
3. Downlink
4. UPlink
5. Multiple Input Multiple Output
6. Frequency Division Duplex
7. Time Division Duplex
8. Orthogonal Frequency Division Multiplexing
9. Single Carrier-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
10. Frequency Division Multiplexing
11. Resource Blocks
12. Resource Elements

13. Radio Link Control
14. Packet Data Convergence Protocol
15. Service Data Unit
16. RLC Protocol Data Unit
17. Medium Access Control

کانال‌های ترافیک، انتقال داده می‌شوند. زمان‌بندی پایین‌سو و بالاسو توسط این لایه پشتیبانی می‌شوند [۲].

لایهٔ PHY: لایهٔ فیزیکی خدماتی را از طریق کانال‌های انتقال به لایهٔ MAC ارائه می‌دهد. قوانین مشخصی به‌منظور چگونگیِ نگاشت کانال‌های منطقی به کانال‌های انتقال (با توجه به نوع انتقال) وجود دارد. نگاشت کانال‌های منطقی به کانال‌های انتقال، در لایهٔ MAC پیاده‌سازی شده است و از این قوانین پیروی می‌کند. لایهٔ فیزیکی برای ادارهٔ رمزگذاری/ رمزگشایی، مدولاسیون/ دی مدولاسیون و دیگر عملکردهای معمول لایهٔ فیزیکی استفاده می‌شود. در نهایت سیگنال‌ها به کانال فیزیکی نگاشت و از طریق واسط رادیویی، انتقال داده می‌شوند [۲].

۳. کیفیت خدمات (QoS) در LTE

کیفیت سرویس در شبکه‌های مخابراتی به قابلیت ارائهٔ اولویت‌های مختلف در برنامه‌های کاربردی، کاربران، نرخ داده یا تضمین ارائهٔ یک سطح تعیین‌شده از جریان داده برای کاربر اشاره می‌کند. مطابق تعریف ITU[1]، بحث QoS در شبکه‌های تلفنی انتظاراتی شامل زمان تأخیر، اتلاف، نسبت سیگنال به نویز، تقاطع مکالمه[2]، اکو صحبت، وقفه‌های ناگهانی، پاسخ فرکانسی و سطح بلندی صدا را مطرح می‌کند.

QoS در LTE دسترسی به اپراتورهای شبکه و خدمات را فراهم می‌کند، به‌وسیلهٔ مجموعه‌ای از ابزارها سرویس را فعال می‌سازد و بین مشترکین با درخواست‌های مختلف تمایز قائل می‌شود. هستهٔ شبکهٔ LTE به‌عنوان EPS[3] شناخته می‌شود که وظیفهٔ آن پشتیبانی از پیکربندی‌های مبتنی بر IP است. در LTE، QoS مبتنی بر کلاس است که در آن، خدماتی توسط اپراتورها به مشترکین ارائه می‌شود. چند مثال از این خدمات شامل تلفن‌های VOIP مبتنی بر زیرسیستم چندرسانه‌ای IP(IMS)[4]، تلویزیون سیار، دسترسی به اینترنت (با سطوح مختلف)، سرویس چندپخشی همه‌پخشی چندرسانه‌ای (MBMS)[5] است.

با توجه به انواع سرویس‌های موجود در شبکهٔ LTE، پارامترهای مهم QoS در این زمینه عبارت‌اند از: کیفیت مکالمه، قدرت آشکارسازی سیگنال، تعداد مکالمات مسدودشده، احتمال قطع شدن مکالمات حین جابجایی مشترک، ارائهٔ مکالمات تصویری، افزایش نرخ ارسال داده برای سرویس‌های چندرسانه‌ای و اتصال به شبکه‌های جهانی، QoS باید به‌گونه‌ای باشند که رضایتمندی مشترکان جلب شود.

۱.۳. حامل[6]ها در شبکه‌های سلولی

در هر ترکیبی از کلاس QoS و آدرس IP ترمینال، یک حامل وجود دارد. حامل برای تفکیک ترافیک به‌منظور فراهم آوردن عملیات متفاوت برای کاربران با نیازمندی‌های QoS متفاوت به‌کار می‌رود. بر طبق عملکرد، دو نوع حامل وجود دارد: GBR[7] و Non-GBR[8]. بر طبق پیکربندی، دو نوع حامل دیگر وجود دارد: حامل پیش‌فرض[9] و حامل تخصیص‌داده‌شده[10]. به‌طور عمومی، یک حامل به‌عنوان یک ارتباط لبه به لبه بین تجهیزات کاربر و دروازهٔ ارتباطی تعریف شده است. حامل‌های GBR در مقابل گم‌شدن بسته‌ها در اثر ازدحام، حفاظت‌شده می‌باشند. این امر توسط توابع کنترل پذیرش موجود در نودهای مختلف شبکه مانند ایستگاه پایه تحقق می‌یابد. حامل GBR معمولاً برحسب تقاضا برپا می‌شود، زیرا این حامل توسط تابع کنترل پذیرش، منابع را رزرو و آن‌ها را مسدود می‌کند؛ درحالی‌که حامل Non-GBR می‌تواند برای مدت طولانی مستقر باقی بماند، زیرا این حامل منابع را مسدود نمی‌کند. هر دو سرویس RT و NRT می‌توانند در حامل GBR تحقق یابند [۳].

همان‌طور که در جدول (۱) ذکر شده است، LTE برای فراهم آوردن QoS، از مجموعه‌ای از حامل‌های EPS (هم در سطح شبکه و هم در سطح کاربر) پشتیبانی می‌کند. UE-AMBR[11] با

1. International Telecommunication Union
2. Cross-Talk
3. Evoled Packet System
4. Ip Multimedia Subsystem
5. Multimedia Broadcast Multicast Service
6. bearers
7. Guaranteed Bit Rate
8. Non-Guaranteed Bit Rate
9. Default bearers
10. Dedicated bearers
11. UE Aggregate Maximum Bit Rate

برپاسازی چندین حامل Non-GBR، از به انحصار درآوردن ظرفیت سلول توسط یک کاربر جلوگیری می‌کند [۴].

جدول (۱): پارامترهای QoS برای حامل EPS [۴]

پارامتر	شرح
شناسهٔ کلاس QoS (QCI)[1]	یک کمیت عددی که از قبل در گره شبکه پیکربندی می‌شود و یک اولویت خاص را نشان می‌دهد؛ مانند حداکثر تأخیر، نرخ خطای بسته. این شاخص همچنین نشان می‌دهد که آیا حامل دارای نرخ بیت تضمین‌شده (GBR) می‌باشد یا خیر (Non-GBR).
سیاست تخصیص و نگهداری (ARP)[2]	در تصمیم‌گیری درباره اولویت‌بندی با توجه به سیاست حامل استفاده می‌شود.
نرخ بیت تضمین‌شده (GBR)	نرخ بیتی که توقع می‌رود توسط حامل فراهم شود، برای حامل‌های Non-GBR قابل اجرا نیست.
ماکزیمم نرخ بیت (MBR)[3]	در 3GPP نسخهٔ ۸ MBR با GBR مساوی است (MBR=GBR).
مجموع ماکزیمم نرخ بیت (AMBR)[4]	مجموع نرخ بیت گروهی از حامل‌های Non-GBR. به اپراتور کمک می‌کند تا به‌وسیلهٔ تخصیص دادن AMBR بیشتر به مشترکان دارای اولویت بالاتر، بین آن‌ها و مشترکان با اولویت پایین‌تر تمایز قائل شود.

۴. زمان‌بندی در شبکه‌های LTE

زمان‌بندی فرایند تصمیم‌گیری توسط برنامه‌ریز به‌منظور تخصیص منابع (زمان، فرکانس) بین کاربران در یک سیستم ارتباطی است. در LTE فرایند زمان‌بندی در eNobeB انجام می‌گیرد. برای این منظور از زمان‌بندی پویای بسته استفاده می‌شود که بر روی تخصیص منابع مختلف به کاربران تحت پوشش، همچنین پارامترهای انتقال مانند مدولاسیون و طرح کدگذاری(MCS)[5] تصمیم‌گیری می‌کند. در شبکه‌های LTE نقش زمان‌بندی منابع بسیار مهم است، زیرا کارایی خوب می‌تواند به‌وسیلهٔ نظارت و تخصیص مناسب منابع به هر کاربر به‌دقت آید. هنگام انتخاب یا طراحی یک الگوریتم زمان‌بندی باید فاکتورهای زیادی مانند سطح QoS مورد انتظار، رفتار منابع و وضعیت کانال‌ها مدنظر قرار گیرند. این موضوع با حضور کاربرانی با خواسته‌های متفاوت برحسب پهنای باند، تأخیر و قابلیت اطمینان پیچیده‌تر می‌شود [۵].

یک الگوریتم زمان‌بندی که با درنظرگرفتن QoS فرایند زمان‌بندی را انجام می‌دهد، eNodeB را قادر می‌سازد تا از تعداد زیادی کاربر به همراه سطح مناسبی از خدمات پشتیبانی کند. این الگوریتم‌ها برخلاف الگوریتم‌های بیشترین تلاش[6] بوده و سرویس‌های قابل‌اعتمادی را به کاربران ارائه می‌دهند. این الگوریتم‌ها به حداکثر استفاده از منابع شبکه و بیشینه کردن کیفیت تجربهٔ کاربر (QoE) منجر می‌شوند.

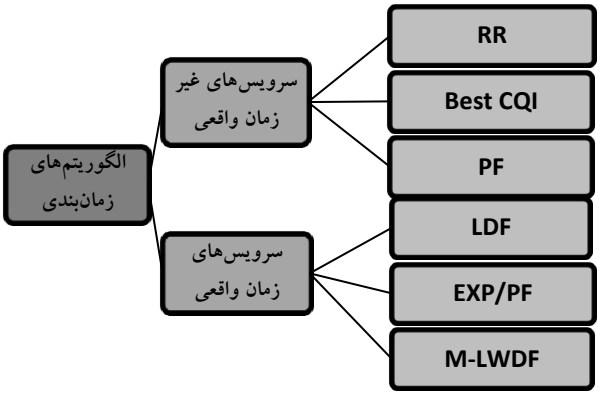
۱.۴. دسته‌بندی الگوریتم‌های زمان‌بندی

به‌طور کلی الگوریتم‌های زمان‌بندی را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: زمان‌بندی وابسته به کانال و زمان‌بندی مستقل از کانال. زمان‌بندی مستقل از کانال به وضعیت کانال کاربر توجهی ندارد؛ بنابراین عملکرد این نوع زمان‌بندی نمی‌تواند بهینه باشد. برخلاف انتظار، زمان‌بندی وابسته به کانال می‌تواند به‌وسیلهٔ تخصیص منابع براساس وضعیت کانال و الگوریتم‌های بهینه به عملکرد بهتری دست یابد. پژوهش جاری بر روی زمان‌بندی وابسته به کانال متمرکز شده است. ازآنجاکه عملکرد الگوریتم‌های زمان‌بندی به‌طور چشمگیری وابسته به نوع جریان‌های ورودی است، زمان‌بندی می‌تواند از دیدگاه برنامه‌های کاربردی نیز تقسیم‌بندی شود. به‌منظور پیاده‌سازی سیستمی با حداکثر کارایی، انتخاب الگوریتم‌هایی مطابق با جریان‌های ورودی (برحسب برنامهٔ کاربردی) بسیار مهم است. با توجه به سرویس‌های اصلیِ LTE ازجمله سرویس‌های صوتی، سرویس‌های داده‌ای و ویدئو زنده، جریان‌ها می‌توانند به جریان‌های زمان واقعی، جریان‌های

1. QoS Class Identifier
2. Allocation and Retention Priority
3. Maximum Bit Rate
4. Aggregate MBR
5. Modulation and coding scheme
6. Best effort

غیر زمان واقعی و ترکیبی از جریان‌های زمان واقعی و غیر زمان واقعی تقسیم‌بندی شوند [۶].

محبوب‌ترین الگوریتم‌های زمان‌بندی که در شکل (۲) دسته‌بندی شده‌اند، برای جریان‌های غیر زمان واقعی، الگوریتم‌های نوبت گردشی (Round Robin)، بهترین شاخص کیفیت کانال (Best CQI) و عدالت نسبی (Proportional Fair) هستند و برای زمان واقعی الگوریتم‌های اول بزرگ‌ترین تأخیر (Largest Delay First)، عدالت نمایی/ نسبی Exponential/Proportional Fair (EXP/PF) و اولین بزرگ‌ترین تأخیر وزن‌دار تغییریافته Modified-Largest Weighted Delay First(M-LWDF) می‌باشند. عملکرد الگوریتم‌های غیر زمان واقعی با توان عملیاتی و عدالت اندازه‌گیری می‌شود و پارامترهای ارزیابی عملکرد جریان‌های زمان واقعی تأخیر تجربه‌شده توسط کاربران، نرخ گم‌شدن بسته و عدالت هستند.



شکل (۲): دسته‌بندی روش‌های زمان‌بندی

۱.۱.۴. الگوریتم زمان‌بندی Round Robin (RR)

الگوریتم زمان‌بندی RR یک طرح زمان‌بندی بدون آگاهی از کانال است که اجازه می‌دهد کاربران به نوبت از منابع اشتراکی استفاده کنند، بدون آنکه به وضعیت کانال توجهی داشته باشد. لذا این شیوه در تخصیص منابع رادیویی، بهترین عدالت را بین کاربران برقرار می‌کند؛ اما عملکرد توان عملیاتی سیستم تنزل پیدا خواهد کرد. الگوریتم RR می‌تواند به دو روش پیاده‌سازی شود که عبارت‌اند از Round Robin دامنهٔ زمان (TDRR)[1] و Round Robin دامنهٔ زمان و فرکانس (TFDRR)[2] در TDRR اولین کاربرِ رسیده، با تمام طیف فرکانسی برای یک مدت زمان معین (TTI)[3] بدون استفاده از اطلاعات مربوط به کیفیت کانال کاربر زمان‌بندی می‌شود. سپس این منابع پس گرفته می‌شوند و به کاربر بعدی در مدت زمان دیگر تخصیص داده می‌شوند. کاربر قبلی در انتهای صف انتظار قرار می‌گیرد؛ بنابراین می‌تواند در دور بعدی با منابع رادیویی زمان‌بندی شود. این الگوریتم به همین شیوه ادامه پیدا می‌کند [۷].

۲.۱.۴. الگوریتم زمان‌بندی Best CQI

در شبکه‌های بی‌سیم در یک زمان مشخص، کاربران مختلف وضعیت کانال مختلفی را تجربه می‌کنند. در هر زمان مشخص، کاربرانی وجود دارد که شانس بیشتری برای زمان‌بندی دارند؛ این کاربران وضعیت کانال بهتری دارند. زمان‌بندی کاربر با بهترین وضعیت کانال رادیویی، زمان‌بندی Best CQI نامیده شده است. الگوریتم زمان‌بندی Best CQI با تخصیص RBها به کاربران دارای کیفیت کانال خوب، به بهبود توان عملیاتی کاربر کمک می‌کند؛ درنتیجه باعث افزایش نرخ داده می‌شود و ظرفیت کل سیستم را به حداکثر می‌رساند. از لحاظ عدالت این اصل زمان‌بندی در همهٔ شرایط عادلانه به نظر نرسیده و می‌تواند بسیار مغرضانه باشد. در واقع، کاربران مختلف به‌علت تفاوت در فاصلهٔ بین آن‌ها و eNodeB به‌طور متوسط وضعیت کانال متفاوتی را تجربه می‌کنند؛ بنابراین در یک مدت طولانی، وضعیت کانال یک کاربر ممکن است از وضعیت کانال کاربر دیگر بدتر باشد. استراتژی زمان‌بندی Best CQI ممکن است منجر شود که کاربر با وضعیت کانال بدتر دچار گرسنگی شود و حتی یک کاربر که در لبهٔ سلول قرار دارد، هرگز زمان‌بندی نشود [۸].

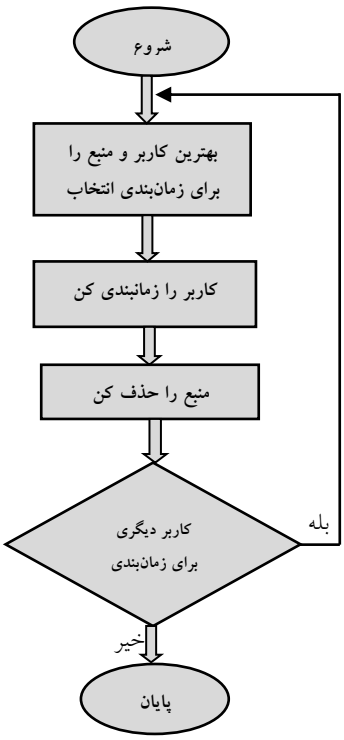
الگوریتم Best CQI موجب بالاترین ظرفیت سلول می‌شود، ولی این وضعیت اغلب از دیدگاه QoS قابل قبول نیست. این الگوریتم توان عملیاتی کاربر را به قیمت از بین بردن عدالت افزایش می‌دهد.

1. Time Domain Round Robin

2. Time And Frequency Domain Round Robin
3. Transmission Time Interval

۳.۱.۴. الگوریتم Proportional Fair (PF)

این الگوریتم به کاربری که کیفیت کانال بهتری دارد، منابع بیشتری می‌دهد؛ یعنی ترکیبی از CQI و سطحی از عدالت به این صورت که در هر لحظه زمانی کاربری را که بیشترین نرخ داده را با توجه به نرخ متوسط خودش دارد، زمان‌بندی می‌کند. بدین ترتیب بیشترین توان عملیاتی سلول به همراه سطحی از عدالت فراهم می‌آید. نسخه‌های مختلفی از الگوریتم PF وجود دارد. در نمودار (۱) یکی از روش‌های ممکن برای پیاده‌سازی الگوریتم PF نشان داده شده است.



نمودار (۱): فلوچارت الگوریتم زمان‌بندی PF

هدف اصلی این الگوریتم رسیدن به تعادل بین بیشترین توان عملیاتی و عدالت است [۸]. الگوریتم PF از نظر میانگین توان عملیاتی سیستم و برقراری عدالت نسبت به دیگر الگوریتم‌ها بهتر عمل می‌کند، اما حداقل QoS را در طول فرایند زمان‌بندی برآورده می‌سازد.

۴.۱.۴. الگوریتم Largest Delay First

در این نوع الگوریتم ایستگاه پایه اولین بستهٔ رسیده را به اولین مکان می‌فرستد و کاربری که بستهٔ HOL[1] آن طولانی‌ترین زمان را در ایستگاه پایه گذرانده است، زمان‌بندی می‌کند و همهٔ آنتن‌ها را به کاربر با طولانی‌ترین تأخیر تخصیص می‌دهد. این الگوریتم را می‌توان طبق رابطهٔ (۱) بیان کرد:

$$i = \arg\max w_k(t) \qquad (۱)$$

در این رابطه، $w_k(t)$ مدت‌زمانی است که بستهٔ متعلق به کاربر k در ایستگاه پایه برای زمان‌بندی سپری کرده است. در اینجا نیز مانند الگوریتم RR، نادیده گرفتن وضعیت کانال منجر به توان عملیاتی ضعیف می‌شود. این الگوریتم در حالت تک‌کاربر از لحاظ تأخیر متوسط، بهترین زمان‌بند است، اما دربارهٔ فضای چند کاربر این امر متفاوت بوده و تخصیص همهٔ آنتن‌ها به کاربر مشابه در هر بازه، تأخیر کاربر سرویس داده شده را با افزایش تأخیرهای سایر کاربران کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه سایر روش‌ها آزادی ارسال هم‌زمان به کاربران متفاوت را دارند، بازدهی تأخیر متوسط بهتری را نشان می‌دهند؛ البته این الگوریتم مرجع خوبی برای ارزیابی تأخیر تجربه‌شده است [۹].

۱.۵.۴. الگوریتم Exponential/Proportional Fair (Exp/PF)

این الگوریتم نسخهٔ بهبودیافتهٔ الگوریتم PF است [۹]. روش PF در حالت چند کاربر، به‌دلیل استفاده از چند آنتنی برای ارسال به کاربران متفاوت در یک زمان مشابه، بازدهی خطایی مشابه روش EXP دارد، چیزی که در حالت تک‌کاربر وجود ندارد. چیزی که در حالت چندکاربری قابل توجه است، نزدیک بودن بازدهی تأخیر روش PF به روش EXP و توان عملیاتی روش EXP به توان عملیاتی PF است. در مقایسهٔ روش‌های EXP و PF می‌توان دید که روش EXP نسبت به روش PF اندکی بیشتر منابع را به ضعیف‌ترین کاربران تخصیص می‌دهد. در نهایت، زمان‌بند EXP می‌کوشد تأخیرهای وزن‌دار همهٔ صف‌ها را درصورتی‌که اختلافشان زیاد باشد، همسان کند. طبق رابطهٔ (۲) در بازهٔ t کاربر kام زمان‌بندی می‌شود.

$$i = \arg\max \gamma_k R_k(t) \exp\left(\frac{a_k w_k - \overline{aw}}{1+\sqrt{\overline{aw}}}\right) \qquad (۲)$$

$$\overline{aw} = \frac{1}{N}\sum_k a_k w_k(t) \qquad (۳)$$

در رابطهٔ ۲، γ_k برابر $\frac{a_k}{\bar{R}_k(t)}$ است و $R_k(t)$ تخمینی از نرخ

1. Head OF Line

دادهٔ پشتیبانی‌شدهٔ کاربر k در برش زمانی t. a_k در رابطهٔ (۲) و (۳) ضریب اولویت برای دسته‌بندی QoS مورد نظر و $w_k(t)$ بیشترین زمانی است که بسته‌های کاربر k در ایستگاه پایه گذرانده‌اند. اگر $a_k w_k$ متعلق به کاربر k با ضریب اولویت a_k بالا یا $w_k(t)$ بیشتر، بزرگ‌تر از متوسط مقدار آن برای همهٔ کاربران (حداکثر تا $\sqrt{\overline{aw}}$) باشد، آنگاه تغییرات exp حکم‌فرما می‌شود؛ بنابراین این کاربر شانس بیشتری نسبت به دیگران برای زمان‌بندی دارد. به عبارت دیگر، زمان‌بند ابتدا منابع را به کاربران با اولویت بالاتر یا تأخیر بیشتر اختصاص می‌دهد. در مقابل، اگر $a_k w_k$ کاربر k خیلی کوچک‌تر از $\sqrt{\overline{aw}}$ باشد، مقدار exp به ۱ نزدیک می‌شود؛ بنابراین فرمول بالا PF می‌شود.

کاهش کمی که در توان عملیاتی این روش نسبت به دیگر روش‌ها وجود دارد و به اجبار صرف برقراری عدالت می‌شود، به‌منظور ضمانت QoS آمده است. این روش زمان‌بندی نیز کارایی تأخیر کاربران با وضعیت کانال نسبتاً بد را بهبود می‌بخشد و سعی دارد زمانی که تأخیر کاربری از متوسط تأخیر همهٔ کاربران بیشتر شد، نیازهای آن را برآورده سازد.

۶.۱.۴. الگوریتم M-LWDF

الگوریتم زمان‌بندی M-LWDF قصد دارد که تأخیرهای هر کاربر را به صورت منحصربه‌فرد با استفاده از اندازهٔ تأخیر و ویژگی‌های کانال متعادل کند. به بیان ریاضی، احتمال تأخیر بیش از یک حد آستانه باید شرط $Pr\{Wk > \tau k\} \leq Pk$ را برآورده سازد. $\overline{R_k} > \overline{r_k}$ نیازمندی توان عملیاتی است، $\overline{R_k}$ متوسط توان عملیاتی کاربر k می‌باشد و $\overline{r_k}$ حداقل توان عملیاتی از پیش تعریف‌شده برای کاربر k است. در هر برش زمانی، کاربر i مطابق با تابع اولویت در رابطهٔ (۴) انتخاب می‌شود.

$$i = \arg\max \gamma k \, R_k(t) \, W_k(t) \qquad (۴)$$

$W_k(t)$ مدت‌زمانی است که بستهٔ متعلق به کاربر k در ایستگاه پایه برای زمان‌بندی سپری کرده است. τk آستانهٔ تأخیر برای کاربر k و P_k بیشترین حد مجاز τ است. فاکتور تأخیر $\gamma_k = \frac{a_k}{\overline{R}_k(t)}$ یک ثابت دلخواه است. یک انتخاب خوب برای γk برابر $\gamma_k = \frac{a_k}{\overline{R}_k(t)}$ است که سطوح QoS دلخواه برای هر کاربر را توصیف می‌کند [۱۰].

روش زمان‌بندی M-LWDF تأخیرهای وزن‌دار هر کاربر را متعادل و سطوح QoS دلخواه را برای هر کاربر ایجاد می‌کند. این روش در مجموع نسبت به بهبود ظرفیت کانال به‌صورت بهینه عمل نمی‌کند، اما تأخیر کاربران با وضعیت کانال نسبتاً بد را بهبود بخشیده و توان عملیاتی بیشتری را در چنین شرایطی فراهم می‌کند. همچنین این زمان‌بند از نظر عدالت به‌صورت منصفانه عمل نمی‌کند.

۷.۱.۴. مزایا و معایب روش‌های زمان‌بندی مطرح‌شده

در جدول (۲)، الگوریتم‌های زمان‌بندی مطرح شده در شبکه‌های LTE به‌طور خلاصه مقایسه شده و مزایا و معایب هریک به اختصار بیان شده تا خواننده بتواند دید کلی از ویژگی‌های هر روش به‌دست آورد.

جدول (۲): مقایسهٔ الگوریتم‌های زمان‌بندی مطرح‌شده

روش زمان‌بندی	مزایا	معایب
RR	– سادگی پیاده‌سازی – برقراری عدالت	– نادیده گرفتن وضعیت کانال – ناکارآمدی – توان عملیاتی پایین – عدم اطلاع از QoS
Best CQI	– اطلاع از وضعیت کانال – بهبود توان عملیاتی	– عدم برقراری عدالت
PF	– زمان‌بندی بیشترین نرخ دیتا – برآورده ساختن میانگین توان عملیاتی – برقراری عدالت	– برآورده ساختن حداقل QoS – بازده طیفی کم
LDF	– جلوگیری از حذف شدن بسته‌های دارای تأخیر بالا	– نادیده گرفتن وضعیت کانال – توان عملیاتی پایین
M-LWDF	– رفتار متفاوت با جریان‌های زمان واقعی و غیر زمان واقعی – متعادل‌سازی تأخیر – توان عملیاتی بالا – توجه به QoS	– ناکارآمد در شرایط Overload – عدم برقراری عدالت
Exp/PF	– رفتار متفاوت با جریان‌های زمان واقعی و غیر زمان واقعی – متعادل‌سازی تأخیر – برقراری عدالت – توان عملیاتی بالا – توجه به QOS	– پیچیدگی پیاده‌سازی

۵. کارهای انجام‌شده در زمینهٔ زمان‌بندی در شبکه‌های LTE

روش‌های مختلفی با هدف استفاده از منابع رادیویی به‌طور مؤثر، به‌منظور برآورده ساختن نیازمندی‌های QoS انواع مختلف ترافیک پیشنهاد شده است. الگوریتم PF یک الگوریتم زمان‌بندی کلاسیک است و هنگامی‌که تغییرات وضعیت کانال اندک باشد، عدالت را برای ترافیک NRT فراهم می‌آورد [۱۱]؛ اما در سناریوهای عملی، این الگوریتم تنها عدالت را برای کاربران فراهم می‌آورد و به نیازمندی‌های QoS آن‌ها هیچ توجهی ندارد [۱۲]. بنابراین الگوریتم‌هایی پیشنهاد شده است تا عملکرد بهتری فراهم آورند؛ برای مثال، الگویتم M-LWDF از اطلاعات تأخیر بسته استفاده می‌کند تا عدالت بهتری برای ترافیک زمان واقعی فراهم آورد [۱۳].

در سال ۲۰۱۴، مکانیسم زمان‌بندی MAC جدیدی برای زمان‌بندی پایین‌سو سیستم‌های LTE براساس الگوریتم آگاه از QoS و کانال پیشنهاد شد که زمان‌بندی فرکانسی و زمانی را انجام می‌دهد [۱۴]. هدف زمان‌بند پیشنهادی به حداکثر رساندن استفاده از منابع رادیویی است به‌طوری‌که QoS مورد نیاز برای کلاس‌های ترافیک را فراهم آورد. روش مطرح‌شده ملزومات QoS محکمی برحسب نرخ بیت و تأخیر مانند VOIP، بازی آنلاین و ویدئو کنفرانس‌ها دارد.

در تحقیقی دیگر، یک سیستم تسهیم دامنهٔ زمانی (TDM) براساس روش M-LWDF که اطلاعات وضعیت صف‌ها و کانال‌ها را در نظر می‌گیرد، ارائه شده است. این الگوریتم کاربری را که دارای بیشترین تأخیر بسته است، زمان‌بندی می‌کند [۱۵]. در روشی دیگر، یک الگوریتم M-LWDF ویرایش‌شده پیشنهاد شده است که وضعیت صف‌ها را بعد از هر تخصیص زیر حامل به‌روزرسانی می‌کند. در این الگوریتم، هر دو نوع ترافیک زمان واقعی و غیر زمان واقعی مورد توجه قرار گرفته و QoS بهتری برای هر دو سرویس فراهم آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند تأخیر سرویس RT و توان عملیاتی سرویس NRT بهبود یافته‌اند [۱۶].

در [۱۷] به‌منظور اولویت دادن به یک سرویس خاص از یک فاکتور استفاده شده است، بدین صورت که هنگامی بسته‌ای از یک جریان سرویس به حد بالای نیازمندی QoSاش نزدیک می‌شود، اولویتش با افزودن این فاکتور افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند نرخ گم‌شدن بستهٔ کاهش‌یافته و عملکرد سیستم به‌وسیلهٔ تضمین نیازمندی‌های QoS سرویس‌های مختلف بهبود یافته است. در [۱۸] یک طرح زمان‌بندی دامنه زمانی و فرکانسی که در دو لایه پیاده‌سازی شده، پیشنهاد شده است. در اولین لایه، الگوریتم در حوزهٔ زمانی پیاده‌سازی شده است تا عدالت در تخصیص منابع رادیویی بین کاربران را حفظ کند. الگوریتم زمان‌بندی دیگری در حوزهٔ فرکانس پیاده‌سازی شده است تا توان عملیاتی را بهبود دهد. به‌طور کلی این الگوریتم بر روی افزایش توان عملیاتی و حفظ عدالت یکسان بین کاربران تمرکز دارد، اما محدودیت تأخیر مربوط به ترافیک چندرسانه‌ای را در نظر نمی‌گیرد. همچنین این طرح زمان‌بندی نیازمندی‌های GBR کاربران را در نظر نمی‌گیرد.

یک تکنیک زمان‌بندی برای شبکه‌های سلولی پیشنهاد شده [۱۹] که دو قسمت دارد: ۱. زمان‌بند ۲. تخصیص‌دهندهٔ منبع. زمان‌بند، جریان‌های ترافیکی را انتخاب و برای هر جریان ترافیکی میزان پهنای باندِ تخصیصی را تعیین می‌کند. تخصیص‌دهندهٔ منبع تعیین می‌کند که کدام زیر کانال به کدام جریان ترافیکی تخصیص یابد. علی‌رغم طراحی واحد تخصیص منبع، الگوریتم پیشنهادشده جریان‌های ترافیکی زمان واقعی را به‌طور مؤثری کنترل نمی‌کند.

انواع مختلف سرویس‌ها به همراه نیازمندی‌های QoS، توسط یک تابع اولویت‌بندی زمان‌بندی شده‌اند [۲۰]. این تابع اولویت‌بندی به‌طور خودکار بر طبق اولویت کلاس سرویس، میانگین نرخ داده، کیفیت کانال و تأخیر به‌روزرسانی می‌شود. این الگوریتم برای انواع مختلف سرویس از QoS پشتیبانی می‌کند و درعین‌حال پیچیدگی پیاده‌سازی کمی دارد. در مطالعه‌ای دیگر، یک الگوریتم زمان‌بندی تأخیر اولویت‌بندی شده (DPS)[1] پیشنهاد شده است که برای اولویت‌بندی از

1. Delay Prioritized Scheduling

اطلاعات تأخیر بسته به همراه بهترین وضعیت کانال استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهند کارایی بهتری در مقایسه با M-LWDF برای ترافیک RT حاصل شده است [۲۱].

نویسندگان [۲۲] مروری بر استراتژی‌های زمان‌بندی در جهت پایین‌سو انجام داده و یک الگوریتم زمان‌بندی برای سرویس‌های RT پیشنهاد کرده‌اند. این الگوریتم شامل سه فاز می‌باشد. برای استفادهٔ بلوک‌های منبع به‌طور مؤثر، این الگوریتم در دامنهٔ فرکانسی طراحی شده است. صف‌های برنامه‌های کاربردی مختلف در دامنهٔ زمانی مدیریت می‌شوند. برای پیش‌بینی تأخیر بسته، ایدهٔ صف مجازی معرفی شده است تا رفتار بسته‌های ورودی آتی براساس بسته‌ها در صف‌های فعلی پیش‌بینی شود. سپس براساس نتایج محاسبه شده، فرایندی معرفی شد که ترتیب بسته‌های انتقالی را دوباره مرتب‌سازی می‌کند و آن دسته از بسته‌هایی که نمی‌توانند نیازمندی‌های تأخیرشان را برآورده سازند، دور انداخته می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادشده می‌تواند عملکرد بهتری در مقایسه با سایر طرح‌های زمان‌بندی داشته باشد.

در یک بررسی جامع [۲۳]، عملکرد سه الگوریتم زمان‌بندی PF، MLWDF و EXP/PF برای شبکه‌های LTE ارزیابی براساس سناریوهای ترافیکی مختلط انجام شده و هدف بررسی نقاط قوت و ضعف این الگوریتم‌هاست. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند هنگامی‌که سطحی از کیفیت سرویس مورد نیاز است، آگاهی از ترافیک زمان واقعی توسط الگوریتم زمان‌بندی اهمیت دارد. همچنین عدم اولویت‌بندی ترافیک چندرسانه‌ای منجر به افت سرویس‌دهی سرویس‌های VOIP و ویدئو خواهد شد؛ حتی اگر بار ترافیک شبکه کم باشد.

چادچان و همکاران یک الگوریتم زمان‌بندی جدید ارائه کردند. الگوریتم پیشنهادی تعادلی بین بهره‌وری طیفی (برحسب توان عملیاتی) و عدالت کاربران برقرار می‌کند. این الگوریتم از یک مدل انتساب برای تخصیص منابع به کاربران انتخاب شده در یک TTI استفاده می‌کند. الگوریتم پیشنهادشده با سه الگوریتم زمان‌بندی RR، Best CQI و الگوریتم زمان‌بندی ارائه‌شده در [۲۴] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادشده، تعادلی بین توان‌عملیاتی و عدالت برقرار می‌کند [۲۵].

مولر و همکارانشان کیفیت سرویس را با درنظرگرفتن استراتژی زمان‌بندی به‌کار گرفته شده و بار سلول[1] مورد بررسی قرار دادند و دو استراتژی زمان‌بندی جدید مبتنی بر الگوریتم زمان‌بندی PF پیشنهاد کردند. در آخر با عملکرد استراتژی‌های زمان‌بندی کلاسیک برحسب تأخیر و توان عملیاتی مورد مقایسه قرار دادند. این الگوریتم‌ها در وضعیت‌های ترافیکی مختلف (سرویس‌های مختلف تحت بار شبکهٔ مختلف) به‌کارگیری شده‌اند [۲۶].

یک طرح زمان‌بندی پیشنهاد شده است که نیازمندی‌های بیشتر کاربران را برآورده می‌سازد. این طرح بین اتصالات زمان واقعی و غیر زمان واقعی تمایز قائل می‌شود [۲۷]. همچنین مشکلاتی مثل گرسنگی و عدالت را مورد توجه قرار می‌دهد. برای برآوردن نیازمندی‌های QoS، اطمینان حاصل می‌شود که هیچ اتصالی در شبکهٔ منابع را برای مدت طولانی اشغال نمی‌کند یا اتصالاتی که برای مدت زمان طولانی منتظر هستند، باید سرویس‌دهی شوند.

بررسی و مقایسه‌ای بر روی ۶ الگوریتم زمان‌بندی FLS، EXP، LOG، PF، MLWDF و EXP/PF در [۲۸] انجام شده و عملکرد روش‌های زمان‌بندی ذکرشده براساس پارامترهای توان عملیاتی، نرخ از دست رفتن بسته، تأخیر بسته و بازده طیفی سلول برای کاربران با سرعت‌های حرکت مختلف برای جریان‌های RT و NRT مانند صدا و تصویر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در [۲۹] یک الگوریتم زمان‌بندی جدید مبتنی بر روش زمان‌بندی PF با نام DBWPF ارائه شده است که به کاربران با تأخیر وزنی بیشتر در جهت Downlink اولویت می‌دهد، به‌طوری‌که کاربر با تأخیر بزرگ‌تر با احتمال بیشتری، منابع را در اختیار می‌گیرد و توان عملیاتی و عدالت را در کنار هم قرار می‌دهد. جهت ارزیابی روش ارائه‌شده، توان عملیاتی و عدالت در این روش با الگوریتم اولیه PF در شبیه‌ساز مقایسه شده و

1. Cell-load

این نتیجه به‌دست آمده است که روش DBWPF در این پارامترها از روش زمان‌بندی اولیهٔ PF بسیار بهتر عمل می‌کند.

۶. شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد روش‌های زمان‌بندی

در این بخش برای اطمینان از اینکه نیازمندی‌های QoS برای سرویس‌های زمان واقعی و غیر زمان واقعی رضایت‌بخش است، دو جریان دادهٔ ویدئویی و وب برای بررسی با استفاده از شبیه‌ساز LTE-SIM پیاده‌سازی شده است. جریان دادهٔ ویدئویی با استفاده از روش زمان‌بندی M-LWDF برای شبیه‌سازی سرویس زمان واقعی، جریان دادهٔ وب با استفاده از روش زمان‌بندی EXP/PF برای ارزیابی پارامترهای مورد نظر در سرویس‌های غیر زمان واقعی انتخاب شدند. علت انتخاب این دو روش زمان‌بندی آگاه به QoS بودن این دو الگوریتم است. همچنین این دو الگوریتم برای سیستم‌هایی که در آن‌ها هر دو جریان ترافیکی RT و NRT وجود دارد، بهتر از دیگر روش‌های زمان‌بندی عمل می‌کنند که برای ارزیابی پارامترهای در نظر گرفته‌شده در این مقاله لازم‌اند.

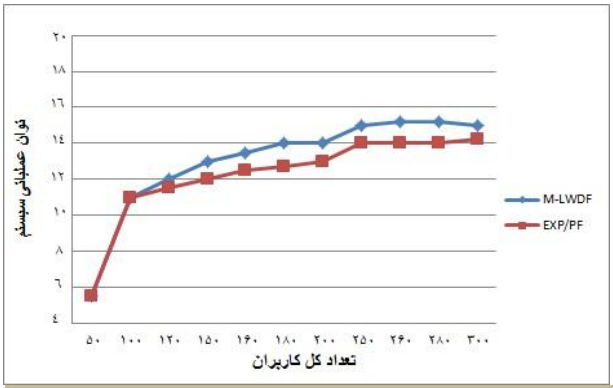
سرویس جریان ویدئویی با نرخ داده ۱۲۸ کیلوبیت بر ثانیه در شبیه‌سازی استفاده و حد آستانه تأخیر بسته HOL برای این سرویس ۲۰ میلی‌ثانیه تنظیم شده است که در واقع حداکثر زمانی است که یک بسته می‌تواند در بافر eNodeB سپری کند. میانگین زمان اجرای یک جریان ویدئویی حدود ۲۳ثانیه فرض شده و حداقل توان عملیاتی برای این سرویس ۱۰۰کیلوبیت بر ثانیه در نظر گرفته شده است، اما باید توجه داشت که برای جریان دادهٔ وب هیچ حداقل توان عملیاتی تعریف نشده است. در الگوریتم EXP/PF زمانی که تأخیر بستهٔ HOL به حد آستانه نزدیک شود، سرویس‌های RT از اولویت بالاتری نسبت به کاربران NRT برخوردار خواهند شد.

مشخصات کلی مربوط به تنظیمات شبیه‌سازی انجام‌شده در جدول (۳) بیان شده‌اند.

جدول (۳): پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
پهنای باند	۵MHz
حامل فرکانسی	۲GHz
تعداد بلوک منبع	۲۵RB
TTI	۱ms
تعداد سلول	۱
اندازهٔ سلول	۳۰۰M
نوع ترافیک	ویدیو-وب(۵۰٪-۵۰٪)
سرعت حرکت کاربر	۱-۱۰۰km/h
مدل تحرک	تصادفی

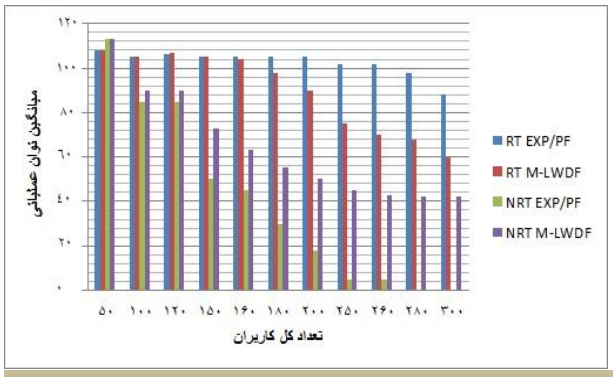
نتیجهٔ اجرای الگوی شبیه‌سازی‌شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که توان عملیاتی کل سیستم به چه شکل خواهد شد و مشخص می‌شود که برای تعداد کاربر کم نتایج هر دو الگوریتم زمان‌بندی مشابه خواهد بود، اما با افزایش تعداد کاربران، روش زمان‌بندی M-LWDF توان عملیاتی بالاتری را برای سیستم فراهم می‌کند.



شکل (۳): توان عملیاتی سیستم نسبت به تعداد کاربران [۳۰]

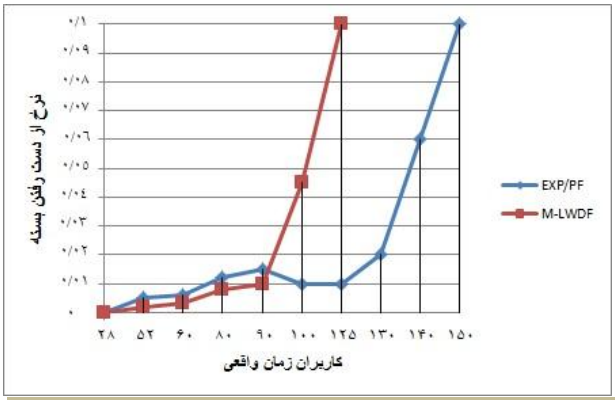
شکل (۴) نشان‌دهندهٔ میانگین توان عملیاتی کاربران سرویس‌های RT و NRT از طریق هر دو روش زمان‌بندی است و این نتیجه بیان می‌شود که روش زمان‌بندی M-LWDF برای کاربران NRT نسبت به EXP/PF میانگین توان عملیاتی بالاتری

را فراهم خواهد کرد و روش EXP/PF به تنهایی می‌تواند توان عملیاتی تضمین‌شده را برای سرویس‌های RT با تعداد کاربر بالای ۱۶۰ فراهم کند. میانگین توان عملیاتی کاربران RT در روش M-LWDF به‌علت درنظرگرفتن تأخیر HOL و شرایط نسبی کانال، با افزایش تعداد کاربران تنزل می‌یابد.



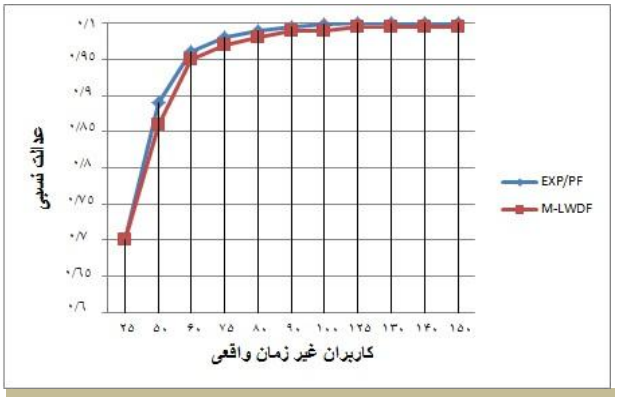
شکل (۴): میانگین توان عملیاتی نسبت به تعداد کاربران [۳۰]

در روش زمان‌بندی M-LWDF برای کاربران RT با کاهش میانگین توان عملیاتی، نرخ از دست رفتن بسته بیشتر می‌شود. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که تا زمان حضور، حدود ۹۰ کاربر در حال استفاده از سرویس‌های زمان واقعی روش M-LWDF با از دست رفتن بسته مواجه نمی‌شود، اما برای روش EXP/PF این رخداد حدود ۱۰۰ کاربر خواهد بود. آنچه عمدتاً به شکست الگوریتم M-LWDF منجر می‌شود، به‌علت تخصیص پویا اولویت‌هایی برای سرویس‌های NRT و RT با توجه به شرایط سخت تأخیر برای سرویس‌های RT می‌باشد.



شکل (۵): نرخ از دست رفتن بسته برای کاربران زمان واقعی [۳۰]

در شکل (۶) نشان داده می‌شود که عدالت در هر دو روش زمان‌بندی با افزایش تعداد کاربران سرویس NRT افزایش می‌یابد و آن‌ها عملکرد عادلانه مشابهی را برای این نوع سرویس‌ها فراهم خواهند کرد.



شکل (۶): وضعیت عدالت برای کاربران غیرزمان واقعی [۳۰]

به‌صورت کلی از نتایج شبیه‌سازی این به‌دست می‌آید که روش زمان‌بندی M-LWDF در مقایسه با EXP/PF عملکرد بهتری را در شرایط میزان ترافیک کمتر با تعداد ۵۰ تا ۱۶۰ کاربر خواهد داشت و روش M-LWDF توان عملیاتی کلی بهتری را برای سیستم فراهم می‌کند و با افزایش میزان ترافیک RT و تعداد بیشتر از ۲۵۰ کاربر، روش EXP/PF دارای توان عملیاتی پایداری خواهد بود.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در شبکه‌های LTE نقش زمان‌بندی منابع بسیار مهم است، زیرا یک کارایی خوب می‌تواند به‌وسیلهٔ نظارت و تخصیص عادلانه منابع به هر کاربر به‌دست آید. با توجه به اینکه 3GPP هیچ الگوریتم زمان‌بندی را استانداردسازی نکرده، انتخاب و پیاده‌سازی هر الگوریتمی که حداقل سطح کیفیت مورد انتظار را برآورده سازد، آزاد است. هنگام انتخاب یا طراحی یک الگوریتم زمان‌بندی فاکتورهای زیادی مانند سطح QoS مورد انتظار، تخصیص عادلانهٔ منابع و توان عملیاتی سیستم باید مدنظر قرار گیرند؛ برای مثال، الگوریتم‌های زمان‌بندی مانند RR، از عدالت و ماکزیمم توان عملیاتی درواقع از QoS آگاه نیستند و ازاین‌رو برای سیستم‌های زمان واقعی، به‌خصوص در انتقال صدا در

شبکه‌های LTE مناسب نمی‌باشند و انتخاب روش زمان‌بندی مناسب مانند EXP/PF یا M-LWDF برای سیستمی که هر دو نوع خدمات RT و NRT را ارائه می‌دهد، بسیار بااهمیت است. این موضوع با حضور کاربرانی با خواسته‌های متفاوت برحسب پهنای باند، تأخیر و قابلیت اطمینان پیچیده‌تر می‌شود.

در مطالعه‌های بعدی قصد داریم الگوریتم زمان‌بند جدیدی ارائه دهیم که مناسب ارسال صدا در شبکه‌هایLTE(VOLTE) باشد تا موجب افزایش رضایت کاربر شود. همچنین می‌توان تأثیر تحرک، تراکم محیط اطراف کاربر و ذخیرهٔ انرژی بر روی کیفیت سرویس را نیز ارزیابی کرد.

مراجع

[1] Dikamba, T., "*Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)*", Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2011.

[2] Tang, Z., "*Trafic Scheduling for LTE Advanced*", Advanced level thesis, Department of Electrical Engineering, Technical University of Linkoping, 2010.

[3] Karthik, R., Nadeem, A., and Arijit, U., "*QoS in LTE and 802.16*", White Paper in Innovation lab, 2010.

[4] Zaki, Y., Thushara, W., Carmelita, G., "*Multi-QoS-aware Fair Scheduling for LTE*", In Vehicular technology conference (VTC spring), IEEE 73rd, 1-5, 2011.

[5] Piro, G., Grieco, A., Boggia, G., "*A Two-level Scheduling Algorithm for QoS Support in the Downlink of LTE Cellular Networks*", In Wireless Conference (EW), IEEE European, 246-253, 2010.

[6] Sadiq, B., Madan, R., Sampath, A., "*Downlink Scheduling for Multiclass Traffic in LTE*", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Article ID510617, 18, 2009.

[7] Iosif, O., Banica, I., "*On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System*", the 4th International Conference on Communication Theory, Budapest, 99-102, 2011.

[8] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., "*3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*", Academic press, Wiley Publishing, 2010.

[9] Shakkottai, S., Stolyar, A., "*Scheduling Algorithm for a Mixture of Real-Time and Non-Real-Time Data in HDR*", 17th International Teletraffic Congress (ITC-17), 793-804, 2001.

[10] Ryu, S., Ryu, H., Seo, H., Shin, M., "*Wireless Packet Scheduling Algorithm for OFDMA System Based on Time-Utility and Channel State*", ETRI Journal, Vol. 27, 777-787, 2005.

[11] Aniba, G., Aissa, S., "*Adaptive Proportional Fairness for Packet Scheduling in HSDPA*", IEEE GLOBECOM, Vol. 6, 4033-4037, 2004.

[12] Kolding, E., "*QoS-aware Proportional Fair Packet Scheduling with Required Activity Detection*", IEEE Vehicular Technoligy Conference (VTC) Montreal, 1-5, 2006.

[13] Xiantao, L., Guangyi, L., Ying, W., "*Downlink Packet Scheduling for Real-time Traffic in Multi-user OFDMA System*", IEEE 64th Vehicular Technology Conference Montreal, 1-5, 2006.

[14] Bojovic, B., Baldo, N., "*A new Channel and QoS Aware Scheduler to Enhance the Capacity of Voice over LTE Systems*" In Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), IEEE 11th International, 1-6, 2014.

[15] Andrews, M., Kumaran, K., Ramanan, K., Stolyar, A., Whiting, P., "*Providing Quality of Service Over a Shared Wireless Link*", IEEE Communication magazine, Vol. 39, 150-154, 2001.

[16] Shen, J., Yi, N., Liu, A., "*Opportunistic Scheduling for Heterogeneous Services in Downlink OFDMA System*", International Conference on Communications and Mobile Computing, Peking University Beijing, P.R.China, 260-264, 2009.

[17] Gutierrez, B., Yang, P., "*Prioritization Function for Packet Scheduling in OFDMA Systems*", Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 1-6, 2010.

[18] Beh, K., Armour, S., Doufexi, A., "*Joint Time-Frequency Domain Proportional Fair Scheduler with HARQ for 3GPP LTE Systems*", IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 1-5, 2008.

[19] Badia, L., Baiocchi, A., Todini, A., Merlin, S., Pupolin, S., Zanella, A.,"*On the Impact of Physical Layer Awareness on Scheduling and Resource Allocation in Broadband Multicellular*", Radio Resource Management and Protocol Engineering for IEEE802.16, IEEE Wireless Communications, 36-43, 2007.

[20] Sandrasegaran, K, Adibah Mohd Ramli, H., Basukala, R., "*Delay-prioritized Scheduling (DPS) for Real Time Traffic in 3GPP LTE System*", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) Australia, 1-6, 2010.

[21] Liu, Q., Wang, X., Giannakis, G., "*A Cross-layer Scheduling Algorithm with QoS Support in Wireless Networks*", IEEE Trans Vehicular Technology, Vol. 55, 839-847, 2006.

[22] Davinder, S., Preeti, S., "*Radio Resource Scheduling in 3GPP LTE*", International Journal of

Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 4, 2405–2411, 2013.

[23] Biernacki, A., Tutschku, K., "*Comparative Performance Study of LTE Downlink Schedulers*", Wireless Personal Communications, Vol. 74, 585-59, 2014.

[24] Gavrilovska, L., Talevski, D., "*Novel Scheduling Algorithms for LTE Downlink Transmission*", Telfor Journal, Vol. 4, 24-25, 2012.

[25] Chadchan, A., "*A Fair Downlink Scheduling Algorithm for 3GPP LTE Networks*", Computer Network and Information Security, Vol. 5, 34-41, 2013.

[26] Muller, M., Schwarz, S., Rupp, M., "*QoS Investigation of Proportional Fair Scheduling in LTE Networks*", IEEE In Wireless Days (WD), IFIP, 1-4, 2013.

[27] Wang, Y., Huang, H., "*A QoS-Based Fairness-Aware Downlink Scheduling in LTE-Advanced*", In Network-Based Information Systems (NBiS), IEEE 17th International Conference, 470-475, 2014.

[28] Dardouri, S., Bouallegue, R., "*Comparative Study of Downlink Packet Scheduling for LTE Networks*", Wireless Personal Communications 82, 1405-1418, 2015.

[29] Liu, S., Zhang, Ch., Zhou, Y., Zhang, Y., "*Delay-Based Weighted Proportional Fair Algorithm for LTE Downlink Packet Scheduling*", Wireless Personal Communications 82, 1955-1965, 2015.

[30] Basukala, R., Adibah Mohd Ramli, H., Sandrasegaran, K., "*Performance Analysis of EXP/PF and M-LWDF in Downlink 3GPP LTE System*", In Internet AH-ICI First Asian Himalayas International Conference, 1-5, 2009.