

دانشکده مهندسی برق

گروه مخابرات

سرویس‌‌های با قابلیت اطمینان بسیار بالا و تاخیر بسیار کم در شبکه‌‌های نسل پنجم (URLLC)

گزارش سمینار کارشناسی ارشد

گرایش مخابرات- سیستم

نگارش:

علی حسینعلی‌پور جزی

استاد راهنما:

دکتر سید محمد رضوی زاده

خرداد 1399



تشکر و قدردانی:

با سپاس از خداوند متعال که همچون تمام مراحل زندگی بنده را در طول انجام این فعالیت با لطف و یاری خویش مساعدت فرمود و راه را جهت رسیدن به نتیجه مطلوب هموار ساخت**.**

همچنیناز پدر و مادرم که در همه‌ ی زمینه‌های همواره یار و پشتیبان من بوده اند سپاس‌گزار هستم.

از استاد گرامی‌ام، دکتر سید محمد رضوی زاده که با راهنمایی‌ها و تجربیات خوب خود بنده را در انجام این پژوهش حمایت و هدایت کرده اند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

از ابتدای معرفی تکنولوژی‌های مخابرات بیسیم، همواره مسائل تاخیر و قابلیت اطمینان به عنوان عوامل محدودکننده در جایگزینی ارتباطات سیمی با ارتباطات بیسیم، مطرح بوده اند. در نسل چهارم مخابرات بیسیم (4G) به مسئله قابلیت اطمینان و راه‌کارهای بهبود آن توجه شده است. اما سرانجام با معرفی نسل پنجم مخابرات (5G) و معرفی کاربردهای مورد پشتیبانی آن، سرویس جدیدی تحت عنوان ارتباطات با قابلیت اطمینان بسیار بالا و تاخیر بسیار کم (URLLC) مطرح شد.

نتایج عددی بدست آمده از مقالات نشان می‌دهد که با سخت‌گیرانه انتخاب کردن تاخیر قابل قبول ، جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مشخص، نیازمند مصرف انرژی و اختصاص منابع بیشتر در حوزه فرکانس خواهیم بود و لذا در حال حاظر کارآمدی انرژی و پهنای باند در سرویس URLLC چشم‌گیر نبوده و نیازمند مطالعات گسترده‌تر در راستای بهبود راه‌کار‌های پیشنهاد شده و همچنین ارائه ایده‌های جدیدتر خواهیم بود.

واژه‌های كلیدی: تاخیر، قابلیت اطمینان، 5G، URLLC، HARQ، دایورسیتی، مخابرات بیسیم

فهرست مطالب

[فصل 1: مقدمه 1](#_Toc100662274)

[1- 1- مقدمه 2](#_Toc100662275)

[1- 2- سیستم‌های مخابراتی نسل پنجم و ششم 2](#_Toc100662276)

[1- 3- سرویس‌های مورد پشتیبانی در 5G NR 3](#_Toc100662277)

[1- 4- کاربرد‌های URLLC 4](#_Toc100662278)

[1- 4- 1- پزشکی از راه دور 4](#_Toc100662279)

[فصل 2: تاخیر در سیستم‌های مخابرات بیسیم 5](#_Toc100662280)

[2- 1- مقدمه 6](#_Toc100662281)

[2- 2- اجزاء تاخیر در لایه فیزیکی 6](#_Toc100662282)

[2- 3- متراکم سازی شبکه 6](#_Toc100662283)

[2- 4- ارتباطات دستگاه با دستگاه (D2D) 7](#_Toc100662284)

[فصل 3: چالش های پیرامون URLLC 9](#_Toc100662285)

[3- 1- مقدمه 10](#_Toc100662286)

[فصل 4: جمع‌بندی و پیشنهادها 12](#_Toc100662287)

[4- 1- مقدمه 13](#_Toc100662288)

[4- 2- نتیجه گیری 13](#_Toc100662289)

[واژه‌نامه 15](#_Toc100662290)

[مراجع 18](#_Toc100662291)

فهرست اشکال

[شکل (1- 1) ارتباط بین قابلیت اطمینان، تاخیر و وقفه.[8] 3](#_Toc100662292)

[شکل (3- 1) قابلیت اطمینان به ازاء استفاده از واسط‌های WiFi، UMTS و GPRS و .[16] 11](#_Toc100662293)

فهرست جداول

[جدول (1- 1) موارد استفاده از URLLC. [10] 7](#_Toc42340990)

[جدول (4- 1) مقادیر نمونه برای قابلیت اطمینان.[9] 43](#_Toc42340991)

[جدول (4- 2) وزن‌دهی واسط‌ها در حالت‌های مختلف. [16] 47](#_Toc42340992)

فهرست اختصارات

3rd Generation Partnership Project 3GPP

5G New Radio 5G NR

Acknowledgement Ack

Augmented Reality AR

Bose, Chaudhuri, and Hocquenghem BCH

Block Error Rate BLER

Base Station BS

Convolutional Codes CC

Channel State Information CSI

Device-to-Device D2D

Dual Connectivity DC

DownLink DL

Energy Efficiency EE

Enhanced Mobile Broadband eMBB

Enhanced Node B  eNB

Frequency Division Multiple Access FDMA

Grant Free GF

General Packet Radio Service  GPRS

Global Positioning System GPS

Hybrid Automatic-Repeat-Request HARQ

Interface Diversity IFD

Internet of Everything IOE

Internet of Things IOT

International Telecommunication Union ITU

Low Density Parity Check LDPC

Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication MBRLLC

Multi Connectivity MC

UL

Universal Mobile Telecommunications System UMTS

Ultra-reliable low-latency communication URLLC

Vehicle-to-Vehicle V2V

Vehicle-to-Everything V2X

Voice Over Internet Protocol VOIP

Virtual Reality VR

Zero Forcing ZF

فهرست علائم اختصاری

بهره مقیاس بزرگ کانال  **

افت SNR **

درصد پیام دریافتی مطلوب **

معکوس تابع Q گاوسی **

احتمال خطای کدبرداری **

تعداد بیت *B*

تابع تاخیر- قابلیت اطمینان *F(x,B)*

بهره مقیاس کوچک کانال *g*

ضریب کانال *h*

چگالی طیف توان یک طرفه نویز *N0*

نرخ بیت *(bps) r*

زمان همدوسی  *Tc* (*sec*)

پراکندگی کانال *V*

پهنای باند *(Hz) W*

تداخل *w*

1. مقدمه

* 1. مقدمه

اطمینان بسیار بالا[[1]](#footnote-1) (URLLC) تقسیم‌بندی می‌نماید. از این رو سازمان [[2]](#footnote-2)3GPP با توجه به نیاز‌های هر کدام از سرویس‌ها، گونه‌ی جدیدی از واسط‌های هوایی را معرفی نموده که به 5G NR معروف است.[1]

به جرات می‌توان گفت که در بین تمام سرویسهای معرفی شده، URLLC چالش برانگیزترین سرویس خواهد بود چرا که همان‌گونه که می‌دانیم، جهت رسیدن به قابلیت اطمینان بسیار زیاد نیازمند صرف منابع در راستای سیگنال دهی، ارسال مجدد، افزونگی و .... خواهیم بود. اما نتیجه استفاده از راه‌‌کارهای گفته شده، افزایش میزان تاخیر در سیستم را به همراه خواهد داشت و در نتیجه میزان گذردهی[[3]](#footnote-3) کاهش پیدا خواهد کرد. بنابراین جهت توسعه URLLC ملزم به توسعه راه‌‌کار‌های جدید در راستای الگوی‌های ارسال، معماری و پروتکل‌های شبکه و خواهیم بود.[2]

طراحی مجدد بخش‌های مختلف آن است.[3]

* 1. سیستم‌های مخابراتی نسل پنجم و ششم

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در راستای استاندارد سازی 5G صورت گرفته و به تازگی نسخه‌هایی از آن در بعضی از کننده هستند، اما مسئله تاخیر در این سیستم به صورت جدی مورد بررسی قرار نگرفته است.[3]

تمرکز اصلی سیستم‌های مخابراتی قبلی نظیر 3G و 4G عمدتا بر روی بهبود کارآمدی طیف[[4]](#footnote-4) و افزایش نرخ در راستای ارتباطات انسان با انسان بوده است اما ITU برای 5G کاربردهایی را درنظر گرفته که عمدتا برای ارتباطات ماشین با ماشین بوده و نیازمند معرفی قابلیت‌های جدید برای شبکه، نظیر ارتباطات با تاخیر بسیار کم و قابلیت اطمینان بسیار بالا (URLLC) در کنار مسئله همیشگی نرخ خواهند بود.[4]

5G می‌تواند توسط یکی از دو زیرساخت رادیویی NR (برای فرکانس‌های بالاتر از 6GHz) و LTE بهبود یافته (برای فرکانس‌های زیر

ابعاد گسترده باشد. تلفیق سرویس URLLC با سرویس‌های eMBB و mMTC در 6G، به ترتیب زمینه ساز معرفی سرویس‌های جدیدی نظیر MBRLLC[[5]](#footnote-5) و mURLLC[[6]](#footnote-6) خواهد بود.[5]

* 1. سرویس‌های مورد پشتیبانی در 5G NR

در ابتدا به مرور مختصر در مورد سرویس‌های پیشنهاد شده برای 5G NR خواهیم پرداخت.

شکل (1-1) توصیف کننده رابطه بین قابلیت اطمینان، تاخیر و احتمال وقفه[[7]](#footnote-7) در شبکه خواهد بود. به‌طور کلی در مواردی که SNR زیاد است، همانند سرویس URLLC، احتمال وقفه می‌تواند تقریب مناسبی برای احتمال خطا باشد.[7] در این شکل Pe خطای باقیمانده[[8]](#footnote-8) ناشی از عدم دریافت موفقیت‌آمیز یک بسته ( با تاخیر بی نهایت) و x نشان‌دهنده مقدار تاخیر در ارسال موفقیت‌آمیز یک بسته است. مقدار عددی هر کدام از پارامتر‌ها با توجه به کاربرد مورد نظر تعیین خواهد شد. مسلما دستیابی به قابلیت اطمینان زیاد مستلزم کاهش Pe خواهد بود اما عکس گزاره گفته شده لزوما صحیح نیست.[8]

|  |
| --- |
|  |
| ارتباط بین قابلیت اطمینان، تاخیر و وقفه.[8] |

* 1. کاربرد‌های URLLC

دو سرویس جدید معرفی شده برای 5G یعنی URLLC و mMTC زمینه ساز فراهم آوردن تکنولوژی‌های جدید در حوزه مخابرات بیسیم بوده که شاید بسیاری از آنها همچنان ناشناخته باشند.

نکته کلیدی در URLLC فراهم آوردن سطح بالایی از قابلیت اطمینان در تامین تاخیر مورد نیاز جهت رشد و ارتقا ارتباطات ماشینی با شرایط کاری حساس[[9]](#footnote-9) ( mission critical MTC) نظیر شبکه هوشمند[[10]](#footnote-10) بوده است. چرا که قبلا قابلیت اطمینان و تاخیر مورد نظر تنها از طریق کابل‌کشی میان قسمت‌های مختلف یک سیستم، نظیر بازوهای مختلف یک ربات در خط تولید یک کارخانه، تامین می‌گردید. اما با گسترش تکنولوژی‌های بیسیم در صنعت و باور به توانایی‌های منحصربه‌فرد آن، تمایل به استفاده هرچه بیشتر از آن در صنایع افزایش یافته است.

* + 1. پزشکی از راه دور

اما این مسئله نیز خود نیازمند تاخیر بسیار کم خواهد بود. بعلاوه در مواردی که پزشک معالج دسترسی به بیمار ندارد، می‌تواند با یک زیر ساخت بسیار ایمن و با نرخ خطای کم، با افراد حاضر در محل بیمار ارتباط برقرار کرده و اقدامات اولیه صورت گیرد.[11]

مورد بررسی قرار گرفته و سپس راه‌‌کار‌های بهبود تاخیر و قابلیت اطمینان معرفی می‌گردند. در فصل چهارم روش‌های پیشنهادی مقالات جهت دستیابی همزمان به قابلیت اطمینان بسیار بالا و تاخیر بسیار کم در مخابرات نسل پنجم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پایان، در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته می‌شود.

1. تاخیر در سیستم‌های مخابرات بیسیم
   1. مقدمه

یکی از چالش برانگیز‌ترین ویژگی‌ها در سرویس URLLC مسئله تاخیر بوده که در نسل‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اما با توجه به کاربرد‌های حساس URLLC این مسئله در مخابرات نسل پنجم بسیار مورد توجه

مورد نیاز بهینه گردد.[6]

در این فصل ابتدا عوامل موثر بر تاخیر ارسال بسته‌ها معرفی شده و در ادامه راه‌‌کار‌های مقالات جهت کاهش تاثیر این عوامل بررسی می‌گردند.

* 1. اجزاء تاخیر در لایه فیزیکی

تاخیر در لایه فیزیکی را می‌توان به صورت حاصل‌جمع 5 مؤلفه همانند رابطه (1-2) معرفی نمود.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در این رابطه Tttt زمان لازم برای ارسال یک بسته، Tprop زمان لازم جهت انتشار سیگنال از سمت فرستنده به گیرنده وابسته به

یکی دیگر از عوامل مهم در ایجاد تاخیر، زمان لازم جهت تخمین کانال و همچنین دریافت اجازه ارسال از سمت ایستگاه پایه[[11]](#footnote-11) (BS) بوده که این مورد نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

* 1. متراکم سازی شبکه

متراکم کردن شبکه از طریق متراکم‌سازی ایستگاه‌های پایه محقق خواهد شد. این راه‌‌کار منجر به کامل شدن پوشش‌دهی ایستگاه‌های پایه و افزایش دسترسی به شبکه می‌گردد. همچنین به دلیل کاهش مسافت میان کاربر و ایستگاه پایه تاخیر انتشار و خطا‌های ناشی از آن کاهش می‌یابند. به‌علاوه به‌دلیل کاهش تعداد کاربران هر سلول، منابع اختصاصی به آن‌ها افزایش یافته و از این ویژگی در راستای دایورسیتی و یا کاهش هر چه بیشتر تاخیر استفاده می‌گردد.[8]

* 1. ارتباطات دستگاه با دستگاه (D2D)

یکی از تکنولوژی‌های مورد انتظار برای 5G ارتباطات ماشینی D2D خواهد بود. در این نوع از ارتباطات دستگاه‌هایی که از نظر فیزیکی به یکدیگر نزدیک هستند به‌طور مستقیم و از طریق لینک‌های به اصطلاح کناری[[12]](#footnote-12) با هم تبادل اطلاعات خواهند نمود. در این‌گونه موارد به دلیل کاهش طول لینک‌ها و همچنین حذف ادوات مخابراتی واسط میان دو دستگاه، تاخیر به شدت کاهش یافته و همچنین از تاثیر این عوامل بر خطا کاسته خواهد شد.[8]

1. چالش های پیرامون URLLC
   1. مقدمه

در فصل‌های قبل پس از معرفی سرویس URLLC، به عوامل تاثیرگذار و راه‌کارهای ارائه شده جهت پیاده‌سازی آن اشاره شد. راه‌کارهای مطرح شده در بخش‌های قبل به تنهایی برای URLLC راه‌گشا نخواهند بود، چرا که اساس معرفی این سرویس، محقق‌سازی ویژگی‌های متناقض با یکدیگر به صورت توام می‌باشد.

در این فصل به بررسی راه‌کارهای پیشنهاد شده در مقالات جهت پیاده‌سازی URLLC و بررسی نتایج عددی حاصل از این طرح‌ها پرداخته می‌شود. موضوعات مطرح شده در این فصل عموماً در راستای مسائل ارائه شده در فصل‌های قبلی خواهند بود.

|  |
| --- |
| وزن‌دهی واسط‌ها در حالت‌های مختلف. [16] |
| |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | weighted | 2-of-3 | cloning |  | | variable |  | 1 |  | |  |  | 1 |  | | 1 |  | 1 |  | |

|  |
| --- |
|  |
| قابلیت اطمینان به ازاء استفاده از واسط‌های WiFi، UMTS و GPRS و .[16] |

با دقت در شکل مشاهده می‌گردد که در حالت‌هایی که خطای واسط‌های بیسیم به یکدیگر وابسته باشند (که با عبارت " MC model" مشخص شده اند) به ازاء یک تاخیر مشخص، قابلیت اطمینان کاهش یافته است که این تفاوت برای حالت همانندسازی و تاخیر‌های بالا، بسیار مشخص‌تر است. نکته مورد توجه در این شکل تاثیر ناچیز وابستگی واسط‌ها در قابلیت اطمینان بدست آمده در حالت وزن‌دهی می‌باشد. در توجیه این پدیده این‌طور می‌توان گفت که در روش وزن‌دهی نوعی وابستگی بین واسط‌های مختلف ناشی از وزن آن‌ها ایجاد شده و وابسته بودن خطا در آن‌ها، کمتر اثرگذار خواهد بود. پس در مواردی که اطلاعی از میزان وابستگی واسط‌های مختلف وجود ندارد روش وزن‌دهی، مناسب‌ترین روش خواهد بود.

1. جمع‌بندی و پیشنهادها
   1. مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و بزرگتر شدن محدوده‌ی کاربردهای مخابرات بیسیم در صنعت، شاهد افزایش تقاضا برای رسیدن به قابلیت اطمینان زیاد و تاخیر بسیار کم هستیم و از این رو URLLC بهترین گزینه برای تامین نیازمندی‌های مطرح شده خواهد بود.

تلاش در راستای تحقق ویژگی‌های متضاد با یکدیگر در URLLC، منجر به طراحی مجدد شبکه مخابرات بیسیم و بهینه‌سازی پارامترهای موثر در آن نظیر انرژی، پهنای باند، تعداد باز ارسال‌ها، مرتبه دایورسیتی و... متناسب با نیازمندی‌های URLLC می‌گردد.

در این جا سعی شد که در ابتدا مروری مختصر بر سرویس‌های مورد پشتیبانی در 5G NR داشته باشیم و سپس به سرویس URLLC و عوامل موثر بر پیاده‌سازی آن پرداخته شود. در ادامه، نتایج عددی حاصل از راه‌کارهای پیشنهادی مقالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و تاثیر ایده‌های مطرح شده بر قابلیت اطمینان، تاخیر، نرخ، کارآمدی انرژی و ... مشاهده گردید.

* 1. نتیجه گیری

با

انرژی در این شیوه می‌گردد. در صورت صرف نظر از تاخیر ارسال بازخوردها، با افزایش تاخیر قابل قبول، و به ازاء تعداد باز ارسال مشخص، مینیمم میانگین انرژی مصرفی کاهش می‌یابد اما به دلیل وجود تاخیر ارسال بازخورد از گیرنده به فرستنده، افزایش بیش از حد تعداد باز ارسال‌ها باعث فراتر رفتن تاخیر از میزان قابل قبول شده و لذا مینیمم میانگین انرژی مصرفی افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر استفاده از باز ارسال‌های زیاد باعث افزایش حداقل نرخ قابل قبول جهت تامین قابلیت اطمینان مورد نظر می‌گردد و به عبارت دیگر بیانگر یک مصالحه میان مرتبه دایورسیتی زمانی و مینیمم نرخ قابل قبول خواهد بود.

یکی از تکنیک‌های شناخته شده جهت بهبود قابلیت اطمینان، تکنیک دایورسیتی بوده که به تفصیل بیان شد. همان‌طور که گفته شد به‌دلیل محدودیت‌های سرویس و شبکه بهترین گزینه جهت پیاده‌سازی دایورسیتی استفاده از دایورسیتی فضایی خواهد بود. ارسال اطلاعات از لینک‌های مجزا باعث افزایش SNR و ظرفیت همزمان در شبکه شده و لذا بدون نیاز به استفاده از کد گذاری‌های پیشرفته قابلیت اطمینان مورد نظر تامین می‌گردد. همچنین به دلیل کاهش طول کلمه کد‌ها تاخیر لازم جهت ارسال بسته‌ها نیز کاهش خواهد یافت.

دایورسیتی می‌تواند از طریق استفاده از واسط‌‌های مستقل از هم و یا ارتباطات چندگانه محقق گردد. علی‌رغم پیچیدگی زیاد

ی اخیر جهت پیاده‌سازی URLLC، همچنان با توجه به ظرفیت‌های موجود در شبکه، محقق‌سازی این سرویس نیازمند مطالعه و تحقیق بیشتر خواهد بود. مواردی که می‌تواند به عنوان مطالعات بعدی در پیاده سازی URLLC مطرح گردد شامل:

* تلاش در راستای ادغام سرویس‌های URLLC، eMBB و mMTC
* ارائه مدل‌های جدید مبتنی بر ارسال بسته‌های با طول کم
* ارائه الگو‌های زمان‌بندی نوین به منظور تامین قابلیت اطمینان توام تمام سرویس‌ها
* تلاش در به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشینی به منظور بهبود URLLC
* بهبود پوشش‌دهی آنتن‌ها جهت افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی به شبکه در URLLC

واژه‌نامه

واژه‌نامه

Actuator محرک

Augmented reality واقعیت افزوده

Base station ایستگاه پایه

Block error rate نرخ خطای بلوک

Blockchain بلاکچین

Carrier Aggregation تجمیع حامل‌ها

Cloning همانند سازی

Cloud Network شبکه ابری

Coherence time زمان همدوسی

Collisions تصادم

Compressed Sensing حسگری فشرده

Concave مقعر

Contention رقابت

Convex محدب

Decoding کدبرداری

Deep fading محوشدگی عمیق

Delay spread گسترش تاخیر کانال

Dispersion پراکندگی

Diversity دایورسیتی

Downlink ارتباط فروسو

Dual Connectivity اتصال دوگانه

Dynamic پویا

Encoding کد گذاری

End-To-End انتها به انتها

Energy efficiency کارآمدی انرژی

Enhanced Mobile Broadband ارتباطات سیار باند وسیع پیشرفته

Fading محوشدگی

Feedback بازخورد

Flying vehicles وسایل نقلیه پرنده

Frequency reuse استفاده مجدد از فرکانس

Frequency selective fading

محوشدگی انتخاب‌گر فرکانسی

Global Optimum پاسخ بهینه سراسری

Grant اجازه

Hamming distance فاصله همینگ

Haptic feedback بازخورد لمسی

Header سرآیند

Interface واسط

Interference تداخل

International Telecommunication Union اتحادیه بین‌المللی مخابرات

licensed مجاز

massive Machine-Type Communications ارتباطات انبوه ماشینی

massive MIMO انبوه آنتنی

mini-slots شیارهای زمانی کوچک

Mission critical Machine-Type Com. ارتباطات ماشینی با شرایط کاری بحرانی

Module واحد

Multi-connectivity ارتباطات چند گانه

Orthogonal multiple access

دسترسی چند گانه متعامد

Outage وقفه

Overhead سربار

Packet Duplication تکرار بسته

Path loss افت مسیر

Performance عملکرد

Pilot پایلوت- سیگنال راهنما

Proactive Strategy استراتژی‌های کنشی

Quasi-static flat fading channel

محوشدگی تخت شبه ایستان

Queueing delay violation

نقض تاخیر صف بندی

Queuing صف بندی

Reactive Strategy استراتژی‌های واکنشی

Release نسخه

Residual error خطای باقیمانده

Scheduling زمان بندی

Security tag برچسب امنیتی

Semi-persistent scheduling

زمان بندی نیمه مداوم

Sensor حسگر

Shadowing پدیده سایه افکنی

Side-link لینک کناری

Spatial Multiplexing مالتی پلکسینگ فضایی

Spectrum efficiency کارآمدی طیف

Splitting تقسیم بندی

Stationary ایستان

Synchronization همزمان سازی

Tactile Internet اینترنت لمسی

Telemedicine پزشکی از راه دور

Throughput گذردهی

Unlicensed بدون مجوز

Uplink ارتباط فراسو

Virtual reality واقعیت مجازی

Threshold آستانه

مراجع

مراجع

[1] ITU-R\_Rec\_M.2083-0, "IMT Vision — Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond," Sept. 2015.

[2] C. Sun, C. She, C. Yang, T. Q. S. Quek, Y. Li, and B. Vucetic, "Optimizing Resource Allocation in the Short Blocklength Regime for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 18, no. 1, pp. 402-415, 2019.

[3] H. Ji, S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee, and B. Shim, "Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects," *IEEE Wireless Communications,* vol. 25, no. 3, pp. 124-130, 2018.

[4] J. Sachs, G. Wikstrom, T. Dudda, R. Baldemair, and K. Kittichokechai, "5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication," *IEEE Network,* vol. 32, no. 2, pp. 24-31, 2018.

[5] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network,* pp. 1-9, 2019.

[6] 3GPP-TR38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 15)," V15.0.0, 2018.

[7] J. P. B. Nadas, O. Onireti, R. D. Souza, H. Alves, G. Brante, and M. A. Imran, "Performance Analysis of Hybrid ARQ for Ultra-Reliable Low Latency Communications," *IEEE Sensors Journal,* vol. 19, no. 9, pp. 3521-3531, 2019.

[8] P. Popovski *et al.*, "Wireless Access for Ultra-Reliable Low-Latency Communication: Principles and Building Blocks," *IEEE Network,* vol. 32, no. 2, pp. 16-23, 2018.

[9] P. Popovski *et al.*, "Wireless Access in Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC)," *IEEE Transactions on Communications,* vol. 67, no. 8, pp. 5783-5801, 2019.

[10] G. J. Sutton *et al.*, "Enabling Technologies for Ultra-Reliable and Low Latency Communications: From PHY and MAC Layer Perspectives," *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 21, no. 3, pp. 2488-2524, 2019.

[11] H. Chen *et al.*, "Ultra-Reliable Low Latency Cellular Networks: Use Cases, Challenges and Approaches," *IEEE Communications Magazine,* vol. 56, no. 12, pp. 119-125, 2018.

[12] A. Anand and G. d. Veciana, "Resource Allocation and HARQ Optimization for URLLC Traffic in 5G Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 36, no. 11, pp. 2411-2421, 2018.

[13] R. Abreu, P. Mogensen, and K. I. Pedersen, "Pre-Scheduled Resources for Retransmissions in Ultra-Reliable and Low Latency Communications," *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),* pp. 1-5, 19-22 March 2017.

[14] C. She, C. Yang, and T. Q. S. Quek, "Radio Resource Management for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications," *IEEE Communications Magazine,* vol. 55, no. 6, pp. 72-78, 2017.

[15] T. K. Vu, C. Liu, M. Bennis, M. Debbah, M. Latva-aho, and C. S. Hong, "Ultra-Reliable and Low Latency Communication in mmWave-Enabled Massive MIMO Networks," *IEEE Communications Letters,* vol. 21, no. 9, pp. 2041-2044, 2017.

[16] J. J. Nielsen, R. Liu, and P. Popovski, "Ultra-Reliable Low Latency Communication Using Interface Diversity," *IEEE Transactions on Communications,* vol. 66, no. 3, pp. 1322-1334, 2018.

[17] M. Shirvanimoghaddam *et al.*, "Short Block-Length Codes for Ultra-Reliable Low Latency Communications," *IEEE Communications Magazine,* vol. 57, no. 2, pp. 130-137, 2019.

[18] A. Avranas, M. Kountouris, and P. Ciblat, "Energy-Latency Tradeoff in Ultra-Reliable Low-Latency Communication With Retransmissions," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 36, no. 11, pp. 2475-2485, 2018.

[19] N. H. Mahmood, M. Lopez, D. Laselva, K. Pedersen, and G. Berardinelli, "Reliability Oriented Dual Connectivity for URLLC services in 5G New Radio," *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS),* pp. 1-6, 28-31 Aug. 2018.

1. Ultra Reliable Low Latency Communications [↑](#footnote-ref-1)
2. 3rd Generation Partnership Project [↑](#footnote-ref-2)
3. Throughput [↑](#footnote-ref-3)
4. Spectrum efficiency [↑](#footnote-ref-4)
5. Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication [↑](#footnote-ref-5)
6. massive URLLC [↑](#footnote-ref-6)
7. Outage [↑](#footnote-ref-7)
8. Residual error [↑](#footnote-ref-8)
9. Mission critical Machine-Type Communication [↑](#footnote-ref-9)
10. Smart Gride [↑](#footnote-ref-10)
11. Base station [↑](#footnote-ref-11)
12. Side link [↑](#footnote-ref-12)