

კატეგორია: 3.3.1. კომპიუტერული მეცნიერება: კომპიუტერული ქსელები და კომუნიკაციები

გადამტანების აგრეგაცია 4G LTE და 5G-NR ქსელებში

გივი მურჯიკნელი¹, კოტე ბეგიაშვილი²

¹პროფესორი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი. g.murjikneli@gtu.ge

²დოქტორანტი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. სადოქტორო პროგრამა- ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები. kotebeg@gmail.com

რეზიუმე

უსადენო კომუნიკაციის ქსელებში გადამტანების აგრეგაცია გვთავაზობს ერთზე მეტი სიხშირული გადამტანის გაერთიანებას და მის გამოყენებას ერთიან სიხშირულ არხად. ეს მიდგომა განაპირობებს რადიო ქსელის გამოყენებით შემოთავაზებული მომსახურებების მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას როგორც LTE, ისე 5G სისტემებში. კერძოდ, ფართოვდება ტევადობის დიაპაზონი, იზრდება მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე და მნიშვნელოვნად უმჯობედება მომხმარებლის გამოცდილება. გარდა ამისა, სიხშირეთა აგრეგაციის გამოყენება განსაკუთრებით აქტუალური გახდა ახალი თაობების 4G, 5G ქსელებში, სადაც მნიშვნელოვანია მისი წვლილი სიხშირული სპექტრის გამოყენების ეფექტურობისა და ქსელის ოპტიმალური ფუნქციონირების უზრუნველყოფის ხაზით. მართალია ეს ტექნოლოგია ახალი არ არის, მაგრამ ერთიან ჭრილში სხვადასხვა თაობებთან მიმართებაში ამ ტექნოლოგიის შესაძლებლობების სრულფასოვანი ანალიზი არ ხორციელდებოდა. ეს ნაშრომი იკვლევს გადამტანების აგრეგაციის ძირითად პრინციპებს, კონცეფციას, მისი დანერგვის თავისებურებებს როგორც უკვე კარგად ცნობილ, ტრადიციულ 4G ქსელებში ასევე შემდეგი თაობის 5G ტექნოლოგიაში. ამ ტექნოლოგიასთან დაკავშირებულ გამოწვევებსა და მისი განვითარების სამომავლო მიმართულებებს.

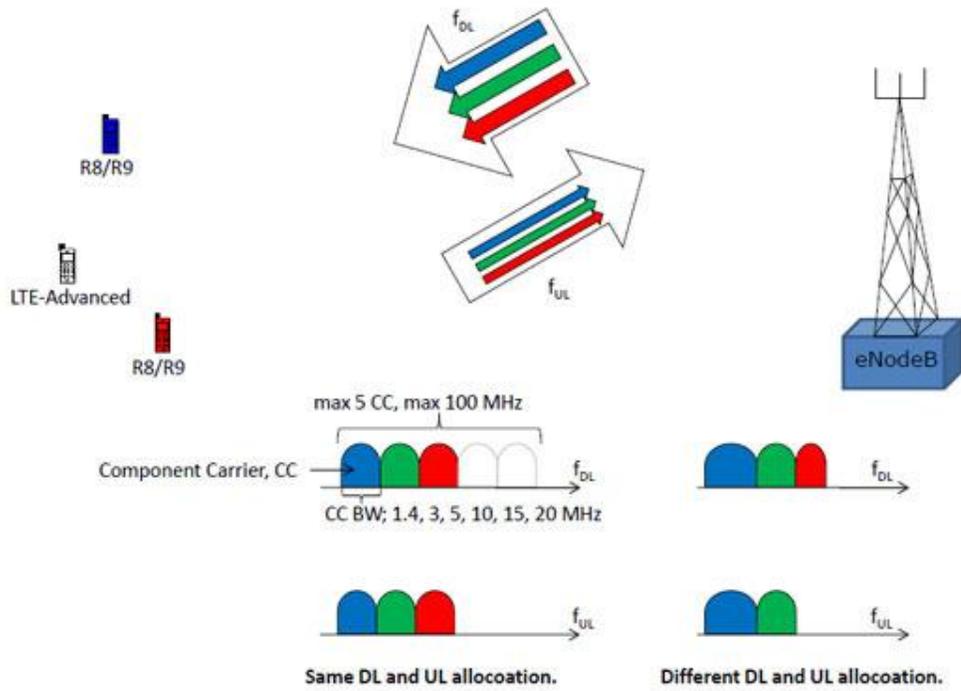
საკვანძო სიტყვები: გადამტანების აგრეგაცია, კომპონენტური, დიაპაზონი, ბიტი წამში, რელიზი, არხი, კლასი.

შესავალი:

გადამტანების აგრეგაცია გაჩნდა, როგორც ფუნდამენტური ტექნოლოგია, რომელიც გარდაქმნის მონაცემთა გადაცემის გზას უკაბელო ქსელებში. მრავალი სიხშირული ზოლის პარალელური გამოყენება პირველად გამოყენებულ იქნა 3G ქსელებში. და ეს ტექნოლოგია ცნობილი იყო როგორც UMTS-ის მოდიფიკაცია - HSPA+ და მაშინდელი თითოეული გადამტანის ზოლი შეზღუდული იყო 5მჰც სიხშირით. თუმცა შემდგომ 4G LTE ტექნოლოგიაში სიხშირული დიაპაზონები გახდა მაქსიმალურად მოქნილი, რათა ათვისებულ ზოლებს შორის დარჩენილი ღრეჩოები მაქსიმალურად ყოფილიყო გამოყენებული. ახალდ შემოთავაზებული სიხშირული ზოლები იყო: 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 მჰც სიგანის. გადამტანების აგრეგაცია მრავალი კომპონენტის კომბინაციით, იძლევა მონაცემთა უფრო მაღალ სიჩქარეს, შემცირებულ შეყოვნებას და მომხმარებლის გაუმჯობესებულ გამოცდილებას LTE და 5G-NR ქსელებში. ეს ნაშრომი სწავლობს 4G და 5G ქსელებში გადამტანების აგრეგაციის დანერგვას, ხაზს უსვამს მის მნიშვნელობას ქსელის სიმძლავრისა და ტევადობის გაზრდაში. განხილულია გადამტანების აგრეგაციის კონფიგურაციის სხვადასხვა ტიპები, მისი გავლენა ქსელის ეფექტურობაზე და მომხმარებლის კმაყოფილებაზე.

გადამტანების აგრეგაციის საფუძვლები

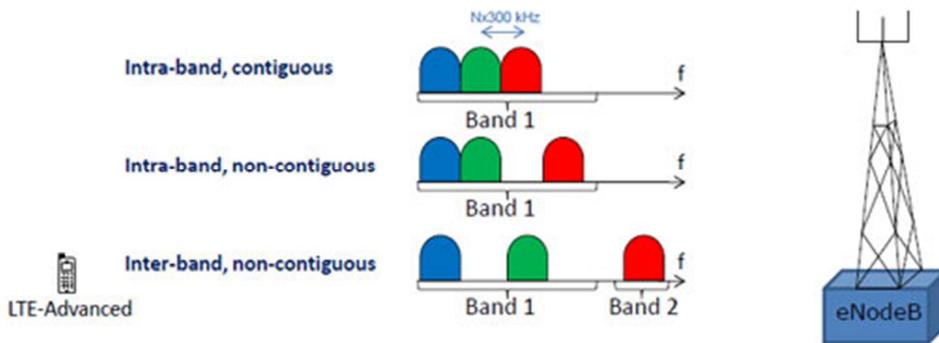
გადამტანების აგრეგაცია არის ფუნდამენტური ტექნოლოგია, რომელიც საშუალებას აძლევს მრავალი LTE ან NR კომპონენტის მატარებლის კომბინაციას მნიშვნელოვნად გაზარდოს გამტარუნარიანობა. ეს ინოვაციური მიდგომა უსაძენო ქსელებში რევოლუციას ახდენს მონაცემთა გადაცემის გზაზე. ამ გადამტანების გაერთიანებით, სისტემას შეუძლია მიაღწიოს მონაცემთა უფრო მაღალ სიჩქარეს, შემცირებულ შეყოვნებას და საერთო გაუმჯობესებულ მომხმარებლის გამოცდილებას. გადამტანის აგრეგაციაში მნიშვნელოვანი პირობა არის წინა R8 და R9 სტანდარტების UE-სთან თავსებადობა [1]. გადამტანის აგრეგაცია შეიძლება გამოყენებული იქნეს ორივე როგორც FDD ასევე TDD, ნახ.1-ზე მოცემულია FDD-ის გამოყენების მაგალითები.



ნახ.1. FDD გადამტანების აგრეგაცია.

LTE-Advanced ტექნოლოგიაში UE -ს შესაძლებელია გამოეყოს აგრეგირებული რესურსებიდან ორი ან მეტი კომპონენტური გადამტანი. R8/R9 UE-ს შეიძლება გამოეყოს ერთი რომელიმე გადამტანიდან. კომპონენტური გადამტანს შეიძლება გააჩნდეს განსხვავებული სიგანე. როგორც ავლენს თითოეული გადამტანი, რომელიც ერთდროულად იღებს მონაწილეობას მონაცემების მიმოცვლაში, მოხსენიებულია, როგორც კომპონენტური გადამტანი. მისი დიაპაზონი შეიძლება იყოს 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz და 4G LTE ტექნოლოგიაში შესაძლებელია მაქსიმუმ ხუთი გადამტანის გაერთიანება. შესაბამისად, მაქსიმალური აგრეგირებული გადამტანის სიგანე შეიძლება იყოს 100 MHz. FDD ტექნოლოგიაში აგრეგირებული გადამტანების რაოდენობა შეიძლება განსხვავებული იყოს DL და UL-ის შემთხვევებში (ნახ.1). ძირითად შემთხვევაში UL კომპონენტური გადამტანების რიცხვი ტოლია ან ნაკლებია DL გადამტანების რაოდენობაზე. ინდივიდუალური კომპონენტური გადამტანებში შესაძლებელია იყოს განსხვავებული სიგანის. TDD-ს შემთხვევაში კომპონენტური გადამტანების რაოდენობა, ასევე ამ გადამტანების დიაპაზონი DL და UL-ისთვის შესაძლოა იყოს ერთიდაიგივე. ყველაზე მარტივი გზა, გადამტანების მოწესრიგებისათვის იქნებოდა, რომ გამოყენებული იქნას კომპონენტური გადამტანები ერთიდაიგივე ოპერირებად სიხშირულ ზოლში, რომელიც ცნობილია როგორც ბლოკმორის მომიჯნავე ზოლების სახელით. ასეთი მიდგომა ყოველთვის შეიძლება ხელმისაწვდომი არ იყოს, ოპერატორის სიხშირული რესურსიდან გამომდინარე. არა მეზობელი ზოლების შემთხვევაში ყველაზე მარტივი შემთხვევა იქნება ერთიდაიგივე სიხშირული ბენდის შიდა ზოლების გამოყენება, როდესაც მათ შორის გვხვდება ღრეჩო, ან ღრეჩოები. თუ ეს

შემთხვევებიც არ არის ხელმისაწვდომი, მაშინ შესაძლოა გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა სიხშირულ ბენდებში არსებული გადამტანები. ზემოთ ხსენებული შემთხვევები მოცემულია ნახ.2-ზე:



ნახ.2. გადამტანის აგრეგაცია, შიდა ზოლური და ზოლებს შორის ალტერნატივები

ორი მომიჯნავე კომპონენტური გადამტანების ცენტრებს შორის დაშორება არის

$$I = N \times 300 \text{ კჰც} \quad (1)$$

სადაც I არის გადამტანების ცენტრებს შორის დაშორება კჰც-ებში, ხოლო N არის ნატურალური რიცხვი. არამომიჯნავე კომპონენტური გადამტანებისთვის ფორმულა (1) არ არის მართებული ვინაიდან მათ შორის ღრეჩო შეიძლება იყოს ერთზე მეტი და სხვადასხვა ტექნოლოგიების მიერ ათვისებული.

პრაქტიკულობიდან გამომდინარე გადამტანის აგრეგაცია და კომპონენტური გადამტანები თავდაპირველად განისაზღვრა მხოლოდ მცირეოდენ E-UTRA ოპერირებად სიხშირულ ზოლში. იმისათვის, რომ განისაზღვროს განსხვავებული გადამტანების აგრეგაციის კომბინაციები დამატებითი ცნებების შემოტანაა საჭირო:

- აგრეგირებული ტრანსმისიის დიაპაზონის კონფიგურაცია (ATBC): აგრეგირებული ფიზიკური რესურს ბლეკების (PRB-ების) ჯამური რაოდენობა.
- CA დიაპაზონის კლასი: განსაზღვრავს მაქსიმუმ ATBC და მაქსიმალური რაოდენობის კომპონენტურ გადამტანებს. მაგალითისთვის R10-ში და R11-ში სამი კლასია განსაზღვრული:
 - კლასი A: $ATBC \leq 100$ კომპონენტური გადამტანების რაოდენობა $CC = 1$
 - კლასი B: $ATBC \leq 100$ კომპონენტური გადამტანების რაოდენობა $CC = 2$
 - კლასი C: $100 < ATBC < 200$ კომპონენტური გადამტანების რაოდენობა $CC=2$
- გადამტანების აგრეგაციის კონფიგურაცია: ახდენს E-UTRA კომბინირებული ბენდების და გადამტანების აგრეგაციის კლასის იდენტიფიკაციას. მაგალითად CA_1C აღნიშნავს

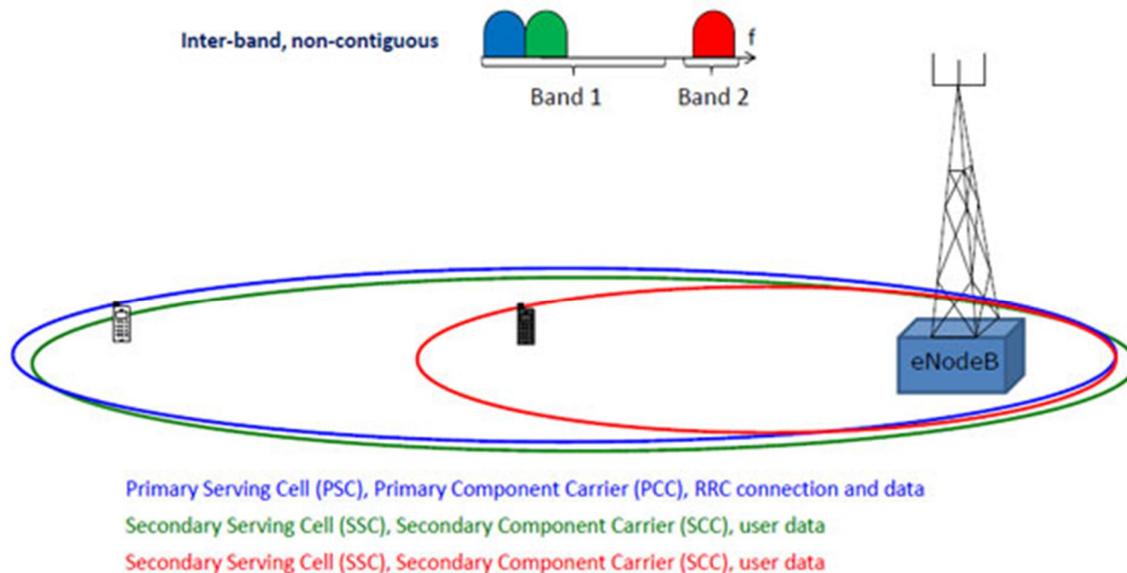
შიდა ბენდის მომიჯნავე ზოლების გადამტანების აგრეგაციას E-UTRA ოპერირებადი ბენდის 1 ნომერში, ხოლო კლასი არის C ანუ $100 < ATBC < 200$. CA_1A_1A: წარმოადგენს შიდა ბენდის არამომიჯნავე გადამტანების აგრეგაციას, ბენდ 1 ში. თითოეულ მხარეს ერთი კომპონენტური გადამტანით. თითოეული გადამტანის კლასი არის A. და ბოლოს CA_1A-5B წარმოადგენს ბენდებს შორის გადამტანების აგრეგაციის შემთხვევას, პრიველო კომპონენტი აღებულია 1-ლი ბენდიდან და მიეკუთვნება A კლასს, ხოლო მეორე კომპონენტური გადამტანი აღებულია მე-5-ე ბენდიდან და მიეკუთვნება B კლასს (ცხრ.1).

ცხრილი 1

გადამტანების აგრეგაციის კონფიგურაციები:

აგრეგაციის ტიპი	აგრეგაციის კოდი	დიაპაზონი (მგჰც)	კომპონენტური გადამტანები
ბენდს შიდა აგრეგ. FDD	CA_1C	40	2
ბენდს შიდა აგრეგ. TDD	CA_40C	40	2
ბენდებს შორის FDD	CA_1A_5A	20	1 + 1

როდესაც გამოიყენება გადამტანის აგრეგაცია, იმდენი მომსახურე ფიჭაა რამდენი კომპონენტური გადამტანიც გხვდება აგრეგაციაში. მომსახურე ფიჭის დაფარვები შეიძლება განსხვავდებოდეს კომპონენტური გადამტანების განსხვავებული სიხშირის გამო, ვინაიდან თავისუფალ სივრცეში დანაკარგები განსხვავებულია. (ნახ.3).



ნახ.3. გადამტანების აგრეგაცია. მთავარი და მეორადი მომსახურე ფიჭები

RRC კავშირი ხორციელდება მხოლოდ ერთი ფიჭიდან, ძირითადი მომსახურე ფიჭიდან, რომელიც ხორციელდება ძირითადი კომპონენტური გადამტანისგან, (PCC). ეს ასევე არის მთავარი DL PCC, რომლის მეშვეობითაც ხდება UE ზე NAS ინფორმაციის მიწოდება, მაგალითად როგორცაა უსაფრთხოების პარამეტრები. გადამტანების უპირატესობა კიდევ არის ის, რომ სხვადასხვა კომპონენტურ გადამტანებს შეიძლება გააჩნდეთ სხვადასხვა დაფარვის არეალი, ანუ განსხვავებული ფიჭის ფართობი. სხვადასხვა ბენდში გადამტანების არსებობა გამოიწვევს განსხვავებულ თავისუფალ სივრცეში მიღევებს, რომელიც იზრდება სიხშირის გაზრდასთან ერთად. როგორც ნახ.3-ზე ვხედავთ სამივე გადამტანით მომსახურება შეუძლია მხოლოდ შავი ფერის ტელეფონს, მაშინ როდესაც თეთრი ტელეფონი არ იმყოფება სამივე კომპონენტური გადამტანის დაფარვის არეალში. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ შესაძლებელია სხვადასხვა ტერმინალებს რომლებსაც ემსახურება ერთიდაიგივე კომპონენტური გადამტანები შესაძლებელია გააჩნდეთ განსხვავებული კომპონენტური გადამტანები.

ცხრ.2. გადამტანების აგრეგაციის ტექნიკური მახასიათებლები

აღსანიშნავია ის გარემოება რომ 3GPP-ის სხვადასხვა რელიზებზე კომპონენტური გადამტანების და შესაბამისად ერთიანი სიხშირული ზოლის დიაპაზონი განსხვავებულია. 3GPP რელიზები და შესაბამისი კომპონენტური გადამტანები მოცემულია ცხრ.2-ში. საიდანაც ჩანს, რომ მოცემულ რელიზებთან ერთად იზრდება ATBC, რათა მრავალ გიგაბიტის სიჩქარე გახდეს ხელმისაწვდომი. აქ მნიშვნელოვანია ის გარემოებაც რომ 5G სისტემებში გადამტანების აგრეგაციისთვის ხელმისაწვდომი გაჩნდა FR2 ბენდიც.

დასკვნა:

	LTE Advanced			LTE Advanced Pro		5G NR
	Release 10	Release 11	Release 12	Release 13	Release 14	Release 15
Max DL/UL CC	5	5	5	32	32	16
Max BW (MHz)	100	100	100	640	640	6400
CC BW (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15,20	1.4, 3, 5, 10, 15,20	1.4, 3, 5, 10, 15,20	1.4, 3, 5, 10, 15,20	1.4, 3, 5, 10, 15,20	FR1(5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100) FR2(50, 100, 200, 4000)

ჩვენს ნაშრომში ნათლად გამოჩნდა, რომ გადამტანების აგრეგაცია წარმოადგენს 4G LTE და 5G-NR სისტემებში ქსელის გაუმჯობესებული მუშაობის და ეფექტურობის მთავარ საშუალებას. მრავალი გადამტანის გაერთიანების გამოყენებით იზრდება ქსელის ტევადობა, უმჯობესდება მომხმარებლის გამოცდილება და ქსელური რესურსების მართვის უკეთესი შესაძლებლობა ჩნდება. მხოლოდ ამ ტექნოლოგიის გამოყენებითაა შესაძლებელი 4 გბტ/წმ ჩამოტვირთვის და 2 გბტ/წმ ატვირთვის სიჩქარის მიღწევა, რაც მნიშვნელოვანი გაუმჯობესებაა ქსელის წარმადობის თვალსაზრისით.

მიუხედავად იმისა, რომ არსებობს გამოწვევები გადამტანების აგრეგაციის რესურსების მენეჯმენტში, მუდმივი კვლევები და ძალისხმევები მიმართულია ამ სირთულეების გადაჭრაზე. მომავალი ტენდენციები და განვითარება გადამტანების აგრეგაციაში, მათ შორის ახალი ტექნოლოგიების ინტეგრაცია, როგორცაა ქსელის დაჭრა და ზღვრული გამოთვლა, გვპირდება ამ ტექნოლოგიის და მომავალი თაობის მობილური კავშირის სისტემების შესაძლებლობების შემდგომ გაფართოებას. არსებული გამოწვევების დაძლევის და სამომავლო ინოვაციების გათვალისწინებით, ოპერატორის აგრეგაცია მზად არის გააგრძელოს უკაბელო ქსელების ევოლუცია და ტრანსფორმაციული კავშირის გამოცდილების მიწოდება მომხმარებლებისთვის მთელ მსოფლიოში.

ლიტერატურა

1. 3GPP. (2024). Retrieved April 04, <https://www.3gpp.org/technologies/101-carrier-aggregation-explained>
2. Nokia. (n.d). Retrieved April 01, <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-carrier-aggregation-explained/>
3. Murjikneli G.G. Begiashvili K.D. (2018). INTERFERENCES IN CONTEMPORARY MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS AND MITIGATION WAYES ANALYSIS, "Energy: Regional Problems and development opportunities". 25.10.2018-26.10.2018
4. Givi Murjikneli, Kote Begiashvili. (2023) Evaluation of the quality indicators of mobile connection based on the use of artificial intelligence methods. MODERN CHALLENGES AND ACHIEVEMENTS IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES. ISBN 978-9941-512-06-3. 85-91
5. Kote Begiashvili. (2024). Investigating global mobile network traffic dynamics and drivers. Georgian Scientists. <https://doi.org/10.52340/gS.2024.06.02.26>

Investigation Carrier Aggregation in 4G LTE and 5G NR Networks

Givi Murjikneli¹. Kote Begiashvili²

¹Professor. Georgian Technical University. Digital Telecommunication Technologies Department

²PHD student. Georgian Technical University. Doctoral Program in Digital Telecommunication Technologies

Abstract:

Carrier aggregation technology provides a significant enhancement to wireless communication networks by enabling the amalgamation of multiple LTE or NR component carriers, thereby increasing bandwidth capacity, improving data rates, and enhancing the overall user experience. This technology plays a key role in both 4G and 5G networks, optimizing spectral efficiency and network performance. This paper explores the fundamentals of carrier aggregation, its implementation in 4G and 5G networks, and the challenges and future directions associated with this technology. Experimental results, case studies, and analysis are presented to evaluate the impact of carrier aggregation on key performance metrics and network efficiency.

Keywords: carrier aggregation, component, bandwidth, bits per second, Release, Channel, class.