

ლოკალური არეალის უსადენო ქსელების მაღალი ეფექტურობის IEEE 802.11ax სტანდარტის მიმოხილვა

1. შესავალი

IEEE 802.11ax სტანდარტი, რომელიც Wi-Fi ალიანსის მიერ განსაზღვრულია როგორც Wi-Fi 6, წარმოადგენს ლოკალური არეალის უსადენო ქსელების (Wireless Local Area Networks, WLAN), ანუ Wi-Fi-ის, ახალ სტანდარტს IEEE 802.11 სტანდარტების ოჯახიდან. ამ სტანდარტის საბოლოო დანერგვა დაგეგმილია 2019 წლის ბოლომდე და მის ბაზაზე აგებულ ქსელებს განიხილავენ, როგორც მაღალი ეფექტურობის უსადენო (High Efficiency Wireless, HEW) ქსელებს. IEEE 802.11ax პროექტს დასაბამი მიეცა 2014 წელს და მისი პირველი სამი დრაფტ ვერსია გამოქვეყნდა 2016 (D1.0), 2017 (D2.0) და 2018 (D3.0) წლებში. პროექტი მუშავდება მაღალი ეფექტურობის უსადენო ლოკალური ქსელების სამუშაო ჯგუფის (Task Group, TG) მიერ.

802.11ax დიზაინის ფორმირების პროცესში ყველაზე გამორჩეული მამოძრავებელი ძალა არის იმის გათვითცნობიერება, რომ დღეს WLAN მოწყობილობები განლაგებულია ძალიან მრავალფეროვან გარემოში, რაც ხასიათდება ლოკალიზებულ გეოგრაფიულ ადგილებში კონცენტრირებული ტერმინალების დიდი რაოდენობის არსებობით. კორპორატიული ოფისები, მასობრივი ღონისძიებების ადგილები, შენობებს გარეთ მოთავსებული დაშვების წერტილები, სავაჭრო ცენტრები, აეროპორტები, საგამოფენო დარბაზები, მჭიდროდ დასახლებული საცხოვრებელი კორპუსები, სტადიონები და ა.შ., ეს არის „მჭიდრო (მკვრივი) გარემოს“ მაგალითები, რომლის დაფარვაც მოითხოვს უამრავი რაოდენობის დაშვების (წვდომის) წერტილებს (ასობით და მეტს), რამაც თავის მხრივ შეიძლება მოითხოვოს ნაწილობრივ გადაფარული არხების მეშვეობით ფუნქციონირება. ასეთ გარემოში ჯამური გამტარუნარიანობა უკვე აღარ წარმოადგენს ეფექტური ფუნქციონირების ძირითად და საინტერესო მახასიათებელს; მიზანია გაიზარდოს გამტარუნარიანობის სიმკვრივე, ანუ გამტარუნარიანობა ფართობის ერთეულზე, რაც განსაზღვრულია ქსელის საერთო გამტარუნარიანობის ფარდობით ქსელის ფართობთან. ცხადია, რომ ასეთ გარემოში მახასიათებლების დეგრადირების ძირითად წყაროს წარმოადგენს მასიური ინტერფერენციები. მაშინ როდესაც IEEE 802.11-ის ადრეულ ვერსიებში ძალისხმევა მიმართული იყო იქითკენ, რომ თავიდან აცილებული ყოფილიყო დაფარული სადგურებიდან (Stations, STA) გადაცემა იმ გადაცემების აკრძალვით, რომლებმაც შეიძლება პოტენციალურად შეიტანონ კონფლიქტები, 11ax ფოკუსირდება გაუმჯობესებაზე, რომელიც ეყრდნობა სივრცის ხელმეორებით გამოყენებას, რაც თავიდან აგვაცილებს ასეთ გამოვლენილ STA-ებს. ამას გარდა, რეალურ სცენარებში, ქსელური მოწყობილობები იშვიათად მოქმედებენ გაჯერებულ რეჟიმში, ანუ მონაცემების გადაცემა, რომლებიც ხელმისაწვდომია გადასაცემად, შეიძლება იყოს საკმაოდ მცირე. განურჩევლად ველის იმ ზომისაგან, რომელსაც იკავებს აგრეგირებული პაკეტი (სტანდარტიზაციით განსაზღვრულ ფარგლებში), არსებობს ფიქსირებული გადასახადი იმ დროის მიხედვით, რომელიც აუცილებელია არხზე დაშვებისათვის, კადრების დაყოფისათვის და დასტურის შეტყობინების გასაგზავნად. ამრიგად, მცირე მონაცემების დატვირთვისთვის, თავსართი (Overhead) გამოსახული პროცენტებში არხის დაკავების მთლიანი დროის მიმართ, შეიძლება იყოს უზარმაზარი, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოყენების ფენის გამტარუნარიანობას, რასაც საბოლოო ჯამში მივყავართ საბოლოო მომხმარებლების არაეფექტურ ფუნქციონირებასთან.

კიდევ ერთი პრობლემა დაკავშირებულია ტრაფიკის ასიმეტრიულობასთან. სოციალური ქსელების ფართო გავრცელება, რომელიც ხასიათდება მომხმარებლის მიერ გენერირებული მულტიმედიაური კონტენტის მნიშვნელოვანი რაოდენობით, ასევე გამოყენებები, რომლებისთვისაც დამახასიათებელია მუდმივი ურთიერთქმედება ცენტრალიზირებულ ღრუბლოვანი (Cloud) შემნახველ სისტემებთან, ქმნიან მნიშვნელოვან დატვირთვას არამარტო ქვემოთ მიმართულ კავშირის ხაზებზე (Downlink, DL), როგორც ამას ჰქონდა ადგილი ინფორმაციის ძებნის სერვერზე-დაფუძნებული ტრადიციული გამოყენებებისათვის, ასევე ზემოთ მიმართული კავშირის ხაზებისათვის (Uplink, UL). DL-ისათვის ეს პრობლემა ნაწილობრივ გადაწყვეტილი იყო 802.11ac ვერსიაში, სადაც გამოიყენება DL მრავალ-მომხმარებლიანი მრავალ-შესასვლელიანი და მრავალ-გამოსასვლელიანი (Multiuser Multiple Input Multiple Output, MU MIMO) ტექნოლოგია. ზემოთ მიმართული კავშირისათვის ასეთი ტექნოლოგია მოითხოვს მკაცრ სინქრონიზაციას, და შესაბამისად მისი სტანდარტიზაცია არ იყო გათვალისწინებული 802.11ax-მდე შემუშავებულ ვერსიებში.

ამ და ასევე სხვა ტექნიკური მიზეზების არსებობის გამო, როგორებიცაა მაგალითად ელექტრული დენის წყაროს - ბატარეის შემცველი მოწყობილობების გაუმჯობესებული ენერგომომხმარება და მომხმარებლებთან ურთიერთქმედების უკეთესი ხარისხის მიღწევა, 2013 წლის მაისში IEEE LAN/MAN სტანდარტების კომიტეტმა შექმნა კვლევითი ჯგუფი HEW, რომელიც შემდეგ გარდაიქმნა სამუშაო ჯგუფად AX (Task Group AX, TGax), რომლის მიერ შემუშავებულ ვერსიებზეც უკვე ვისაუბრეთ პარაგრაფის დასაწყისში.

წინამდებარე დოკუმენტის დანარჩენი ნაწილი შემდეგნაირად არის ორგანიზებული. მე-2 პარაგრაფში ჩვენ მოკლედ განვიხილავთ 802.11ax ვერსიამდე არსებულ ვერსიებში გამოყენებულ ტექნოლოგიებს და მათ მახასიათებლებს. მე-3 პარაგრაფში ჩვენ ზოგადად წარმოვადგენთ 802.11ax ვერსიაში გამოყენებულ ტექნოლოგიებს და მათ მახასიათებლებს, ხოლო დარჩენილ პარაგრაფებში, განვიხილავთ 802.11ax ვერსიაში გამოყენებულ ისეთ სპეციფიკურ საკითხებს, როგორებიცაა მოდულაცია-კოდირება (პარაგრაფი 4), MU MIMO (პარაგრაფი 5), ფიზიკური ფენის (PHY) ფრეიმის ფორმატი (პარაგრაფი 6), 802.11ax ვერსიაში ორთოგონალური სიხშირული დაყოფის მრავალჯერადი დაშვებით (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) გამოყენება (პარაგრაფი 7), გადაფარვის მართვა და სივრცის განმეორებითი გამოყენება 802.11ax-ში (პარაგრაფი 8) და ელექტროენერგიით კვებასთან დაკავშირებული საკითხები (პარაგრაფი 9).

2. 802.11ax სტანდარტამდე

უკანასკნელი 20 წლის განმავლობაში 802.11 სტანდარტში შემუშავებული იქნა რიგი მოდიფიკაციები და დამატებები, კერძოდ 802.11a/b/g/n/ac, რომლებიც თანდათანობით აუმჯობესებდნენ გადაცემის ნომინალურ სიჩარეს. ყველაზე უფრო ძველი ვერსიები, კერძოდ 802.11a/b/g, უბრალოდ იყენებდნენ იმ პერიოდისათვის ახალ მოდულაცია-კოდირების სქემებს, რათა გაეზარდათ თავდაპირველად შემუშავებული 802.11-1997 სტანდარტის 2 მბიტ/წმ სიჩქარე 54 მბიტ/წმ სიჩქარემდე ორივე 2.4 გჰც (802.11g) და 5 გჰც (802.11a) არალიცენზირებად სიხშირულ დიაპაზონებში. 802.11n-ის შემოტანით გადაიდგა მნიშვნელოვანი ნაბიჯი ადრეული Wi-Fi-ის სტანდარტის გაუმჯობესების პროცესში. მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეები მნიშვნელოვნად გაიზარდა (თეორიულ მაქსიმუმად 600 მბიტ/წმ) სხვადასხვა ტექნიკის კომბინირებული გამოყენებით. ისინი მოიცავდა: (ა) შესაძლებლობას გამოყენებულ იქნას არხები სიგანით 40 მჰც-მდე, რომელიც ორჯერ აღემატებოდა ადრინდელ 802.11 PHY-ში (ფიზიკურ ფენაში)

გამოყენებულ სიხშირულ ზოლებს, (ზ) ადრინდელ 3/4 სიჩქარეებთან შედარებით უფრო მაღალი სიჩქარის ხელხელამდგრადი კოდური სიჩქარეების (5/6) გამოყენებას, ასევე, რაც ყველაზე უფრო მნიშვნელოვანია, (გ) 802.11n-ში MIMO ტექნოლოგიის გამოყენებას, სადაც ერთდროულად გადაიცემოდა 4-მდე სივრცითი ნაკადი მოწყობილობების წყვილებს შორის, რამაც საგრძნობლად გაზარდა მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე.

სიჩქარეების გაზრდასთან ერთად 802.11n უზრუნველყოფს სხვადასხვა გაუმჯობესებებს გარემოზე წვდომის მართვის (Medium Access Control, MAC) ფენის კუთხით. მისი მიზანია თავსართის შემცირება ფრეიმებს შორის სივრცისათვის, პრეამბულებისათვის და მმართველი ფრეიმებისათვის, რაც სხვა შემთხვევაში არ უზრუნველყოფს მახასიათებლების უპირატესობას ახლად შემუშავებული PHY-თვის. შესაბამისად 802.11n-ში, რათა მოხდეს განცალკევება ერთსა და იმავე სადგურებისათვის, შემოტანილი იქნა ახალი ფრეიმებს შორის შემცირებული სივრცე (Reduced InterFrame Space, RIFS) ხანგრძლივობით 2 მკწმ, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას 10 და 16 მკწმ ხანგრძლივობის ფრეიმებს შორის მოკლე სივრცის (Short InterFrame Space, SIFS) ნაცვლად. ამას გარდა 802.11n განიხილავს აგრეგაციის ორ მეთოდს, სადაც გამოიყენება A-MSDU (MAC სერვისის მონაცემთა აგრეგირებული ბლოკი, MAC Service Data Unit) და A-MPDU (MAC პროტოკოლის მონაცემთა აგრეგირებული ბლოკი, MAC Protocol Data Unit). პირველი მათგანი ამატებს რამდენიმე აგრეგირებულ პაკეტს ერთი MAC სათაურით და შემმოწმებელი ჯამით. მეორე მათგანი თითოეულ აგრეგირებულ პაკეტს ამატებს MAC სათაურს და შემმოწმებელ ჯამს. ასეთი აგრეგაცია საშუალებას გვაძლევს გავაუმჯობესოთ გადაცემის საიმედოობა ვინაიდან საშუალებას იძლევა მოხდეს, სულ მცირე, ზოგიერთი პაკეტის სწორი დეკოდირება, რომლებიც შეიცავენ ხანმოკლე ხმაურით გამოწვეული შეცდომების ჯგუფებს, თავსართის უმნიშვნელოდ გაზრდის სანაცვლოდ.

IEEE 802.11 სამუშაო ჯგუფი ისტორიულად მნიშვნელოვან ძალისხმევას იყენებდა Wi-Fi ქსელებში მომსახურების ხარისხის (Quality of Service, QoS) გასაუმჯობესებლად. კერძოდ, 802.11e ვერსიის ცვლილებებით გათვალისწინებულია განაწილებული არხის გაფართოებული წვდომა და არხის ჰიბრიდული კონტროლირებადი წვდომა, რომელიც განასხვავებს ხმას, ვიდეოს, და სხვადასხვა ტიპის ტრაფიკებს და ემსახურება მათ განსხვავებულად. მიუხედავად იმისა, რომ პირველი მათგანი მხოლოდ ანიჭებს სხვადასხვა პრიორიტეტებს ამ ტიპის ტრაფიკებს, მეორე მათგანი (კარგად დახვეწის შემთხვევაში) საშუალებას აძლევს წვდომის წერტილებს (Access Points, AP)-ს დაგეგმოს გადაცემები QoS-ის სპეციფიკური მოთხოვნების გათვალისწინებით, როგორცაა დაგვიანების დრო, პაკეტის დაკარგვის კოეფიციენტი ან საჭირო გამტარუნარიანობა. ამასთან, ზუსტი მოთხოვნების დადგენა არ არის ტრივიალური ამოცანა და, სავარაუდოდ, წარმოქმნის კონფლიქტების გარეშე შექმნილი არხზე დაშვების ჰიბრიდული მმართველი მოწყობილობების მწირი განლაგების კიდევ ერთ მიზეზს.

მრავალი მოწყობილობისთვის, რომელიც იყენებს Wi-Fi-ს (მაგ., ლეპტოპები და სმარტფონები) ელექტროენერჯის მოხმარება მნიშვნელოვანი საკითხია. 802.11 ქსელში ელექტროენერჯის მენეჯმენტი ემყარება ალტერნატივას ორ მდგომარეობას შორის: გაღვიძებული და მთვლემარე. გაღვიძებულ მდგომარეობაში, STA-ს შეუძლია გადასცეს და მიიღოს ფრეიმები, ხოლო მთვლემარე მდგომარეობაში, მისი რადიო გამორთულია. აქტიური STA ყოველთვის იმყოფება გაღვიძებულ მდგომარეობაში, ხოლო ენერჯის დაზოგვის (Power Saving, PS) STA მონაცვლეობს ამ მდგომარეობებს შორის. AP ბუფერში ინახავს მონაცემებს განკუთვნილ PS STA-სთვის, სანამ STA არ გამოიღვიძებს და არ ამოიღებს მათ. ბევრი ტექნიკური ინოვაცია შესაძლებელს ხდის მიღწეულ იქნას ენერჯის დაზოგვის ახალი უკეთესი მახასიათებლები, მაგრამ მათი უმეტესობა რადიოს საკმაოდ დიდ დროით გამორთვას უკავშირდება, ე.ი. ასობით მილიწამით ან თუნდაც წამებით. ზოგიერთ მათგანი მოითხოვს, რომ PS STA-მ იბრძოლოს არხისათვის, თუ მას სურს

მონაცემთა ამოღება AP-დან. ასეთი მეთოდები არაეფექტურია მკვირივი (მჭიდროდ განთავსებული) გარემოსათვის კონფლიქტების, უზარმაზარი თავსართის და დიდი შეფერხებების გამო. ზოგიერთი სხვა მეთოდი საშუალებას აძლევს AP-ს და PS STA-ს წინასწარ დაგეგმონ ის შემთხვევები, როდესაც STA ახდენს AP-ს მონაცემების ამოღებას. ასეთი სერიების პერიოდი დამოკიდებულია QoS მოთხოვნებზე.

დაბოლოს, 802.11ac ვერსია დაინერგა ძირითადად მონაცემების სიჩქარის მნიშვნელოვნად გაზრდის მიზნით, დაახლოებით 10-ჯერ, 802.11n-თან შედარებით. 802.11ac, სივრცითი ნაკადების რაოდენობის გაზრდის გარდა, მართავს პრობლემას, თუ როგორ უნდა ფუნქციონირებდნენ ტერმინალები, რომლებიც წარმოების კუთხით არსებული სხვადასხვა მიზეზების გამო, ვერ განალაგებენ და გამოიყენებენ 1 ან 2 ანტენაზე მეტს. ამ მიზნით, 802.11ac ვერსიაში პირველად შემოიღეს DL-ში მრავალმომხმარებლიანი MIMO (DL MU-MIMO), რომელიც AP-ს საშუალებას აძლევს განსაზღვროს სხვადასხვა DL სივრცის ნაკადები სხვადასხვა STA-სთვის (UL-თვის იგივე ტექნოლოგიის დანერგვა, კერძოდ UL MU, გადაიდო შემდეგი სტანდარტებისათვის, სინქრონიზაციაზე ძალიან მკაცრი მოთხოვნების გამო, რომელიც საჭიროებდა მნიშვნელოვანად განახლებულ დიზაინს). გარდა ამისა, 802.11ac აფართოებს გადამცემ სიხშირულ დიაპაზონს 160 მჰც-მდე (სადაც შეიძლება გამოყენებულ იქნას არამომიჯნავე 80 მჰც + 80 მჰც არხები) და ზრდის სიგნალურ კონსტალაციებს 256 სიგნალის შემცველ კვადრატორულ ამპლიტუდურ მოდულაციამდე (256-Quadrature Amplitude Modulation, 256-QAM)), რომელიც თავის მხრივ ზრდის მონაცემების გადაცემის სიჩქარეს 7 გბიტ/წმ-მდე. ფრეიმის სიგრძე გაზრდილია 65 535-დან (802.11n) 4 692 480 ოქტეტამდე. მიუხედავად ამისა, მოკლე პაკეტებისთვის, როგორცაა მყისიერი შეტყობინებები, ვებ მოთხოვნა, გადაცემის მართვის პროტოკოლის დასტურები და ა.შ., არხი კვლავ არაეფექტურად გამოიყენება.

3. 802.11ax სტანდარტის ძირითადი მახასიათებლები

წინა ვერსიების მსგავსად, რომლებიც აუმჯობესებენ ბიტების გადაცემის ნომინალურ სიჩქარეს 802.11ax შეიცავს ახალ PHY პროტოკოლს უფრო მაღალი რიგის მოდულაციით და გაუმჯობესებული ხელშეშლამდგრადი კოდირების სქემით. საგულისხმოა, რომ 802.11ac-გან განსხვავებით, 802.11ax არ ზრდის MIMO-ში სივრცული ნაკადის რაოდენობას და არ აფართოებს არხს. მისთვის სიჩქარის ნომინალური მაჩვენებლები გაიზრდება 9.6 გბიტ/წმ-მდე, რაც მხოლოდ 37%-ით მეტია 802.11ac-თან შედარებით (და ასეთი ზრდა ძალიან მცირეა 802.11n-თან შედარებით 802.11ac-ს სიჩქარის 10-ჯერ გაზრდის გათვალისწინებით). მომხმარებლის გამტარუნარიანობის სასურველი ზრდა მიიღწევა სიხშირული სპექტრის უფრო ეფექტურად გამოყენებით.

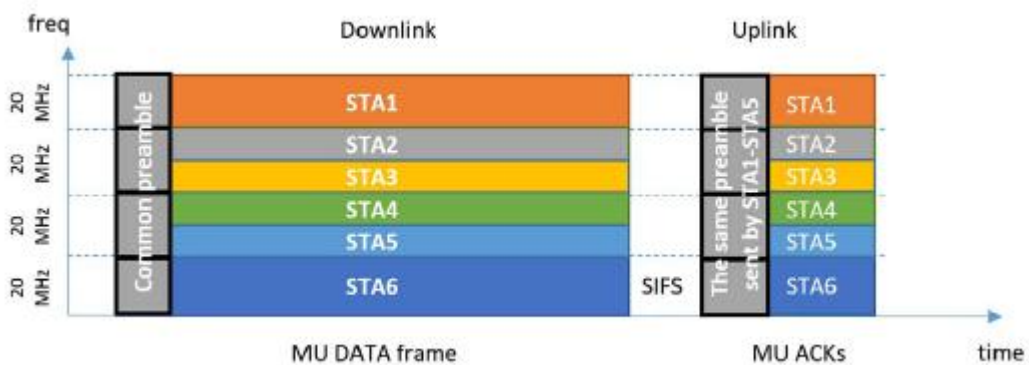
802.11ax-ის მთავარი დამახასიათებელი თვისებაა OFDMA მიდგომის შემოტანა, მიდგომის, რომელიც ფართოდ გამოიყენება ფიჭურ ქსელებში, მაგრამ ახალია Wi-Fi-თვის. დასაბუთება ისაა, რომ ძალიან ფართო არხები (80 მჰც, 80 მჰც + 80 მჰც და 160 მჰც), რომლებიც გამოიყენება 802.11ac-შიც განიცდიან სიხშირის მიმართ სელექციურ ინტერფერენციებს, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს პრაქტიკულად შესაძლებელ მიღწევად სიჩქარეებს. OFDMA-ს გამოყენებისას, მომიჯნავე ქვეგადამტანები (ტონები) ჯგუფდება ერთად რესურს-ბლოკში (Resource Unit, RU) და გამზავნის შეუძლია აირჩიოს საუკეთესო RU თითოეული კონკრეტული მიმღებისთვის, რაც განაპირობებს მაღალ სიგნალ/(ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურის) თანაფარდობას (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR), უკეთეს მოდულაცია-კოდირების სქემას და გაზრდილ გამტარუნარიანობას. უფრო მეტიც, ვინაიდან მონაცემების მაღალი სიჩქარით გადაცემის ეფექტურობა მცირდება, როდესაც STA-ს მხოლოდ რამდენიმე მონაცემი აქვს გადასაცემი, აგრეგაციის

მოწინავე ტექნიკის გამოყენება, რომელიც მიზნად ისახავს არხზე წვდომის შემცირებას, დასტურის (Acknowledgement, ACK) და პრეამბულით გამოწვეული თავსართის გამოყენება უსარგებლო ხდება. ვიწრო RU-ების გამოყოფა ასეთი STA-ებისთვის ეფექტური საშუალებაა. უახლესი გამოკვლევების თანახმად, OFDMA უზრუნველყოფს 6-ჯერ უფრო მაღალი გამტარუნარიანობას, ვიდრე არსებული სისტემები.

OFDMA აახლოებს Wi-Fi რადიო წვდომას LTE-თან. ამასთან, LTE-გან განსხვავებით, აქ OFDMA კოორდინირებულია AP-ს მიერ. ეს ნიშნავს, რომ არხზე წვდომისას, AP-ს შეუძლია დაიწყოს ჩვეულებრივი DL გადაცემა, DL MU გადაცემა (OFDMA-ს, MIMO-ს ან ორივეს გამოყენებით), ან გამოყოს RU-ები UL MU გადაცემისთვის.

LTE-ში, OFDMA არის დროზე დაფუძნებული, ანუ სხვადასხვა ტონები შეესაბამება სხვადასხვა სამომხმარებლო მოწყობილობას, გადაცემის დროის ერთი ინტერვალის განმავლობაში. 802.11ax-ში OFDMA არის ფრეიმზე დაფუძნებული, ანუ MU მონაცემთა ფრეიმი შეიცავს მონაცემებს მიმართულს სხვადასხვა მომხმარებლებისაკენ/სხვადასხვა მომხმარებლებიდან და სხვადასხვა ტონები ენიჭება მომხმარებლებს მთელი ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში (იხ. სურათი 1).

DL MU გადაცემისას PHY საერთო პრეამბულა განსაზღვრავს ფრეიმის ხანგრძლივობას და STA-ებს შორის ტონების ასახვას. ამის საპირისპიროდ, UL MU გადაცემისათვის, ასეთი გრაფიკი განსაზღვრულია წინა ფრეიმით, რომელიც შეიძლება იყოს ან ტრიგერის ფრეიმი (ახალი მმართველი ფრეიმი, რომელიც გამოყოფს არხს UL MU გადაცემისათვის) ან მონაცემთა ფრეიმი, რომლის თავსართი შეიცავს ინფორმაციას მონაცემთა გადაცემის გრაფიკის შესახებ. ეს უკანასკნელი განსაკუთრებით სასარგებლოა დასტურის მიღებისათვის DL MU გადაცემაზე. UL MU გადაცემა იწყება DL ფრეიმის შემდგომ (რომელიც შეიცავს გრაფიკს) ზუსტად ერთი SIFS-ის შესაბამისი დროის გავლის შემდეგ. ყოველივე ეს საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ UL MU გადაცემაში მონაწილე STA-ების სინქრონიზაცია, იმისდა მიუხედავად თუ რომელი ტექნიკა გამოიყენება STA-ბისათვის: OFDMA, MIMO თუ ორივე ერთად.



სურათი 1. OFDMA გადაცემის მაგალითი 802.11ax-თვის.

Wi-Fi-ში OFDMA-ს შემოტანა ზემოქმედებს სხვა MAC და PHY ფუნქციონირებაზე. პირველი, TGax ცვლის OFDMA პარამეტრებს რათა გააუმჯობესოს OFDMA ოპერაციების მოქნილობა და ეფექტურობა. მეორე, TGax ცვლის PHY-ს ფრეიმის ფორმატს, რათა PHY პრეამბულაში ჩართოს OFDMA-თან დაკავშირებული ინფორმაცია. უფრო მეტიც, TGax აგრძელებს MAC-ფენის ინფორმაციის გადატანას PHY პრეამბულაში, ვინაიდან ხანდახან შესაძლებელია მოვახდინოთ პრეამბულის დეკოდირება, მაშინაც კი როდესაც მთლიანი ფრეიმი დაზიანებულია. მესამე, OFDMA-ს შემოტანა იწვევს მრავალ MAC ცვლილებებს, რომლებიც დაკავშირებულია MU ოპერაციასთან და სხვადასხვა თაობის მოწყობილობებს შორის გამართულ ურთიერთქმედებასთან.

OFDMA-ს გარდა დიდი ძალისხმევა იქნა მიმართული რათა გაუმჯობესებულიყო გამტარუნარიანობა და შემცირებული ყოფილიყო ენერგომომხმარება გადაფარულ და მკვრივ ქსელებში. ახალი მახასიათებლების ჩამონათვალიდან შეგვიძლია გამოვყოთ:

ა. ძირითადი მომსახურების კომპლექტის (Basic Service Set, BSS) შეღებვა - 802.11ac-დან და 802.11ah-დან მემკვიდრეობით მიღებული (და გაფართოებული), რომელიც საშუალებას იძლევა განასხვავოთ ინტერ- და ინტრა-ფრეიმები მათი პრეამბულების საფუძველზე, თუნდაც ფრეიმის დატვირთვები დაზიანებული იყოს კონფლიქტებით;

ბ. მემკვიდრეობით მიღებული ვირტუალური გადამტანის რამდენიმე მოდიფიკაცია, რომელიც ცნობილია როგორც ქსელის განაწილების ვექტორი (Network Allocation Vector, NAV);

გ. ვირტუალიზაცია;

დ. მიკროძილის ოპერაცია, რომელიც საშუალებას აძლევს STA-ს გამორთოს თავისი რადიომოწყობილობა, მხოლოდ სხვა STA-ს ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში;

ე. გადამუშავებული მიზნობრივი ობიექტის გაღვიძების დრო (Target Wakeup Time, TWT), რომელიც თავდაპირველად შემოტანილი იქნა 802.11ah-ში.

ცხრილი 1.

	არსებული ვერსიები	ახალი 802.11ax ვერსია
სიხშირული სპექტრი	40 მჰც-მდე 2.4 გჰც (11n) და 160 მჰც-მდე 5 გჰც (11ac) დიაპაზონებში	40 მჰც-მდე 2.4 გჰც და 160 მჰც-მდე 5 გჰც დიაპაზონებში
OFDM-ში სიგნალთა კონსტელაციების ზომა	256 QAM	1024 QAM
OFDM სიგნალის ხანგრძლივობა	3.2 მკწმ	12.8 მკწმ
OFDM-ის დამცავი ინტერვალი	0.4 ან 0.8 მკწმ (10% ან 20% თავსართის შემთხვევაში)	0.8 ან 1.6 ან 3.2 მკწმ (5 % ან 10% ან 20% თავსართის შემთხვევაში)
MIMO-ს რიგი	4 (11n), 8(11ac)	8
გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე	დაახლოებით 7 გბიტ/წმ	დაახლოებით 9.6 გბიტ/წმ
MU ტექნოლოგია	MU-MIMO (11ac)	MU-MIMO, OFDMA
MU-ს გადაცემის მიმართულება	DL (11ac)	DL და UL
აგრეგაცია	A-MSDU, A-MPDU (11n) ფრაგმენტაციის გარეშე	A-MSDU, A-MPDU ფრაგმენტაციით
ინტერფერენციებისაგან დაცვა	NAV	ორი NAV, უმოქმედობის პერიოდი
სივრცის განმეორებითი გამოყენება	სექტორიზაცია (11ab)	სიმძლავრის და მგრძობიანობის ადაპტიური ზღვრუბლები
ელექტროენერგიით კვების მართვა	სხვადასხვა	გაუმჯობესებული TWT, გაუმჯობესებული მიკროძილი

ამას გარდა, მნიშვნელოვანი სამუშაოები ჩატარდა, რათა გაუმჯობესებულიყო სივრცითი განმეორებითი გამოყენება მკვრივი განთავსებების დროს, მგრძობელობითი ზღვრების და გადაცემის სიმძლავრის ცვლილებების მეშვეობით. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს თემა დღემდე ყველაზე განხილვადია TGax-ის მიმდინარე სამუშაოებში, ვინაიდან მან შესაძლოა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს ქსელის ფუნქციონირება.

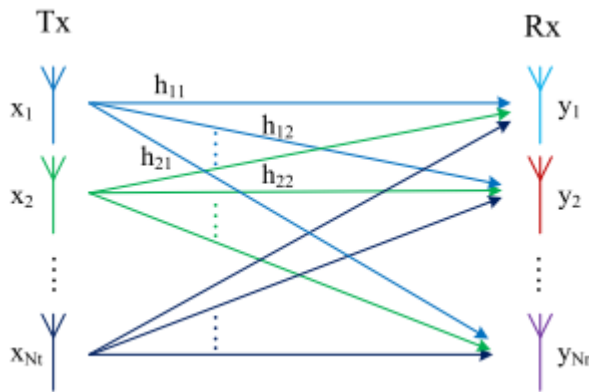
ცხრილი 1 წარმოგვიდგენს 802.11ax-ის ძირითად ახალ მახასიათებლებს, რომლებიც უფრო დეტალურად იქნება აღწერილი შემდგომში.

4. მოდულაცია-კოდირება

802.11ax-ის PHY იყენებს მისი წინამორბედის 802.11ac-ს ზოგიერთ ასპექტს. 802.11ac-ს მსგავსად ის დაფუძნებულია მულტიპლექსირებაზე ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) და მხარს უჭერს ოპერირებას 20 მჰც, 40 მჰც, 80 მჰც, 80+80 მჰც და 160 მჰც არხებში. შევნიშნოთ, რომ უწყვეტი 160 მჰც არხისაგან განსხვავებით 80+80 მჰც არხი წარმოადგენს ორი არამომიჯნავე 80 მჰც-ანი არხის გაერთიანებას. ტონების რაოდენობის გაზრდის მიზნით, რაც სასურველია OFDMA-თვის, TGax-მა ოთხჯერ გაზარდა PHY-ში ფუნქციონირებადი OFDM სიგნალის ხანგრძლივობა 12.8 მკწმ-მდე. ასეთი დიდი ზომის OFDM სიმბოლოები უფრო კარგად ებრძვიან სიმბოლოებს შორის არსებულ ინტერფერენციებს, რაც დამახასიათებელია შენობის გარეთ გარემოში მუშაობისათვის და რაც ძალიან მნიშვნელოვანია UL MU გადაცემისათვის, რომელიც შეიძლება განხორციელებული იქნას ერთდროულად რამდენიმე მომხმარებლისათვის. უფრო მეტიც, სიმბოლოების გადაცემის დროის გახანგრძლივება შესაძლებლობას იძლევა შემცირდეს დამცავი ინტერვალით (Guard Interval, GI) შექმნილი თავსართი. საგულისხმოა, რომ არხში არსებული პირობების გათვალისწინებით, 802.11ax მოწყობილობას შეუძლია განაცალკევოს OFDM სიმბოლოები GI-ს საშუალებით, რომელიც შეიძლება არჩეულ იქნას სიდიდეებიდან {0.8 მკწმ, 1.6 მკწმ და 3.2 მკწმ}, რაც საშუალებას იძლევა შემცირდეს თავსართის სიდიდე 6%-ით, მაშინ როდესაც 802.11ac-ში GI თავსართი მთლიანად შეადგენს 12-25%-ს. 802.11ax-ს ასევე შემოაქვს ახალი მოდულაციის ტექნიკა და არსებულ BPSK (Binary Phase-Shift Keying, ორობითი მანიპულაცია ფაზური წანაცვლებით), 16-QAM, 64-QAM და 256-QAM მოდულაციებს ემატება 1024-QAM, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას შენობის შიგნით ფუნქციონირებისას ძალიან კარგი საარხო პირობებისათვის, ანუ მაღალი SINR-თვის. შეცდომების გამასწორებელ კოდებთან (ხვევად კოდებთან ან დაბალი სიმკვრივის ლუწობაზე შემმოწმებელ კოდებთან) ერთად, რომლებსაც აქვთ სიჩქარეები 1/2, 2/3, 3/4 და 5/6 - ეს მოდულაციები აგენერირებენ 9.6 გბიტ/წმ-მდე მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეებს. ასეთი მაღალი სიჩქარეები მიღწევადია თუ კოდის სიჩქარე 5/6-ია და გამოიყენება 160 მჰც-იანი ან 80+80 მჰც-ანი არხი 8 სივრცითი ნაკადით და GI ტოლია 0.8 მკწმ-ის. ამას გარდა 802.11ax აღწერს ოპციურ მოდულაციას დუალური გადამტანებით (Dual Carrier Modulation, DCM). ეს უკანასკნელი აუმჯობესებს გადაცემის რობასტულობას ერთი და იგივე სიგნალის ტონების წყვილზე განთავსებით, რომლებიც ძალიან არიან დაზარებული სიხშირულ დომენში. TGax-ის მიერ ჩატარებული წინასწარი კვლევების მიხედვით ასეთი ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა გაუმკლავდეს ზოლსშიდა ინტერფერენციებს და უზრუნველყოფს 2 დბ-ზე მეტ მოგებას პაკეტებზე შეცდომის ალბათობის მახასიათებლებისათვის. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ერთი და იგივე მონაცემების ორჯერ გადაცემის გამო DCM ორჯერ ამცირებს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს და ამიტომ DCM-ის გამოყენება მიზანშეწონილია მხოლოდ შედარებით რობასტულ მოდულაცია-კოდირების სქემებისათვის.

5. MU-MIMO

მრავალ-შესასვლელიანი და მრავალ-გამოსასვლელიანი (MIMO) ტექნოლოგია უზრუნველყოფს უსადენო კავშირის ხაზის გამტარუნარიანობის გაზრდას, იყენებს რა სიგნალის მრავალი გზით გავრცელების თავისებურებას და მრავალ გადამცემ და მიმღებ ანტენებს. როდესაც მიმღები და გადამცემი ანტენების მესერებში თვითონ ანტენები დაშორებულია ერთმანეთის მიმართ საკმაო მანძილზე სიგნალის გადაცემისას მრავალგზიანობით გამოწვეული მიყუჩება (ფედინგი), რომელსაც განიცდის სიგნალი, განსხვავებულია იმ სიტუაციისაგან, როდესაც მიღება-გადაცემისათვის გამოიყენება ანტენების ერთი წყვილი. როგორც ნაჩვენებია მე-2 სურათზე, MIMO არხისათვის N_t გადამცემი ანტენით და N_r მიმღები ანტენით, შესასვლელსა და გამოსასვლელს შორის დამოკიდებულება განისაზღვრება ფორმულით $y = H^T x + n$, სადაც $x = [x_1, \dots, x_{N_t}]^T$ სიმბოლოთა ვექტორია, რომელიც გადაიცემა N_t გადამცემი ანტენებით, ხოლო $y = [y_1, \dots, y_{N_r}]^T$ სიმბოლოთა ვექტორია მიღებული N_r მიმღები ანტენებით, $n = [n_1, \dots, n_{N_r}]^T$ წარმოადგენს ხმაურის ვექტორს და H $N_t \times N_r$ მატრიცაა, რომელიც შეიცავს არხის გადაცემის კოეფიციენტებს.



სურათი 2. MIMO-ს არხის მოდელი N_t გადამცემი ანტენით, N_r მიმღები ანტენით და i -ურ გადამცემ ანტენასა და j -ურ მიმღებ ანტენას შორის h_{ij} არხის გადაცემის კოეფიციენტი.

მიმღებ-გადამცემ ანტენებს შორის არხის ხარისხში განსხვავება გამოიყენება ან სიგნალის გადაცემისას საიმედოობის გაუმჯობესებისათვის (სიგნალების გავრცელების სხვადასხვა გზების წყალობით, ანუ სივრცითი განცალკევებით), ან სხვადასხვა გადამცემი ანტენებიდან დამოუკიდებელი ნაკადების ერთროულად გადაცემისათვის, რასაც ასევე უწოდებენ სივრცით მულტიპლექსირებას. სივრცითი მულტიპლექსირების დროს თუ გადამცემს გააჩნია N_t გადამცემი ანტენა, ხოლო მიმღებს N_r მიმღები ანტენა მონაცემთა ნაკადების მაქსიმალური რაოდენობა ტოლია $N_s = \min(N_t, N_r)$. აღნიშნულს მივყავართ სპექტრალური ეფექტურობის N_s -ჯერ გაზრდამდე ერთ-შესასვლელიან და ერთ-გამოსასვლელიან (Single Input Single Output, SISO) ტექნოლოგიასთან შედარებით. MIMO-ს უპირატესობა მიიღწევა სიგნალთა დამუშავების უფრო რთული ალგორითმების გამოყენებით და არხის შესახებ ინფორმაციის (Channel State Information, CSI) წვდომით გადამცემზე და/ან მიმღებზე. MIMO სქემებში ღია მარყუჟით, CSI (ანუ H მატრიცა) არ არის ხელმისაწვდომი გადამცემზე და მიმღებზე და ამიტომ მიმღები იყენებს იმ CSI-ის, რომელიც ფორმირდება x ვექტორის გადაცემის შედეგად მიღებული y ვექტორის დეკოდირების პროცესში. მეორეს მხრივ MIMO სქემებში დახურული მარყუჟით, CSI ხელმისაწვდომია გადამცემზე (მიმღებიდან უკუკავშირის არხის მეშვეობით) და ის გამოიყენება გადასაცემი სიმბოლოების წინასწარი კოდირების პროცესში. როგორც

კვლევები გვიჩვენებენ MIMO სქემებს დახურული მარყუჟით აქვთ უპირატესობა (დაახლოებით 2 დბ ენერგეტიკული მოგება) MIMO სქემებთან შედარებით ღია მარყუჟით.

ერთმომხმარებლიან MIMO სისტემაში (Single User MIMO, SU-MIMO), გადაცემა ხორციელდება ერთ გადამცემს და ერთ მიმღებს შორის, რომლებიც იყენებენ მრავალ ანტენებს. მეორეს მხრივ, მრავალმომხმარებლიან MIMO სისტემაში (MU-MIMO), ხელმისაწვდომი ანტენები გავრცელებულია მრავალ დამოუკიდებელ მიმღებსა და გადაცემზე. MU-MIMO იყენებს სივრცის მიხედვით გადანაწილებულ მომხმარებელთა ადგილმდებარეობებს, რათა მიღწეული იქნას მრავალჯერადი დაშვების სივრცითი მოგება, რაც სასარგებლოა როდესაც STA-ების რაოდენობა დიდია და ანტენების რაოდენობა AP-თვის უფრო მეტია, ვიდრე ანტენების რაოდენობა თითოეულ STA-ში. გარდა ამისა, MU-MIMO უფრო იმუნიტეტია სიგნალის გავრცელებასთან დაკავშირებული საკითხების კუთხით, რომლის დროსაც წარმოშობილი პრობლემები ძალიან ზიანის მომტანია SU-MIMO-ისათვის და ახდენს ასეთი სისტემების მახასიათებლების გაუარესებას, რაც გამოწვეულია ანტენის კორელაციებით ან არხის რანგის დანაკარგებით. MU-MIMO შეიძლება დაიყოს MIMO სამაუწყებლო არხებად (MIMO Broadcasting, MIMO-BC) და MIMO მრავალჯერადი დაშვების არხებად (MIMO Multiple Access Channels, MIMO-MAC). MIMO-BC განიხილავს ერთდროულ გადაცემას ერთი AP-დან მრავალ STA-ზე, იყენებს რა სივრცულად მულტიპლექსირებულ DL ნაკადებს, ხოლო MIMO-MAC განიხილავს ერთდროულ გადაცემას მრავალი STA-დან ერთ AP-ზე, სივრცულად მულტიპლექსირებული UL ნაკადების გამოყენებით. SU-MIMO სისტემებისგან განსხვავებით, MIMO-BC სქემების უმეტესობა მოითხოვს CSI-ის გამოყენებას გადამცემ AP-ში. გადამცემი მხარეს CSI-ს მიღება, ზოგადად, უფრო ძვირად ღირებული ამოცანაა, ვიდრე მიმღების მხარეს, ვინაიდან აუცილებელია მიმღების მხრიდან უკუკავშირის შეტყობინებების მიღება. ამასთან, MIMO-MAC მოითხოვს CSI-ის მხოლოდ მიმღებ AP-ში, რაც ნაკლებად ძვირი ჯდება სიგნალური თავსართის გამო, MIMO-BC-თან შედარებით. MU-MIMO სისტემები ლიტერატურაში ფართოდ არის შესწავლილი, მათში გამოყენებული ორივე MIMO-BC და MIMO-MAC სქემისათვის.

IEEE 802.11n ვერსიაში, SU-MIMO მონაცემების ნაკადი ზღვრული ოდენობის რაოდენობა შეზღუდულია ოთხამდე AP-ს და STA-ს შორის. SU-MIMO-ის ერთდროული DL ნაკადის მაქსიმალური რაოდენობა IEEE 802.11ac ვერსიაში გაზრდილია 8-მდე. ასევე, IEEE 802.11ac უზრუნველყოფს მონაცემთა ერთდროულ ოთხამდე DL ნაკადს MU-MIMO STA-თვის (მაგ. MIMO-BC). IEEE 802.11 TGax-ის მიერ შემოთავაზებულია 802.11ax-ისთვის UL MU-MIMO (მაგ. MIMO-MAC) და დიდი რაოდენობით ანტენების გამოყენება (Massive-MIMO).

6. PHY ფრეიმის ფორმატი

DL MU გადაცემის განსაკუთრებული თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ ფრეიმი შეიცავს საერთო პრეამბულას, რომელიც აღწერს რომელი ტონების დეკოდირება უნდა მოახდინოს კონკრეტულმა მიმღებმა, რომ მიიღოს მონაცემთა ველის საკუთარი ნაწილი. ანალოგიურად, UL MU გადაცემისას, პრეამბულა საერთოა და ის სხივდება ყველა STA-გან. ამის შემდეგ, ყველა STA გადასცემს მონაცემთა ველიდან მისთვის განკუთვნილ ნაწილს, რისთვისაც იყენებს წინასწარ განსაზღვრული ტონების ერთობლიობას.

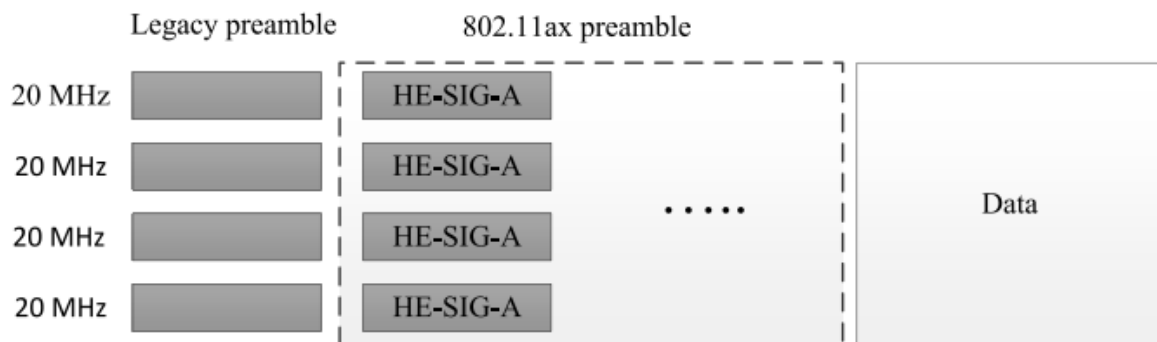
TGax განსაზღვრავს PHY ფრეიმის ოთხ ფორმატს: ერთმომხმარებლიანი (SU) გადაცემისათვის, გაფართოებული დიაპაზონის SU გადაცემისათვის (აქ გადაცემა ხდება 20 მჰც-ან არხში და გამოიყენება შედარებით მარტივი მოდულაცია-კოდირების სქემა MIMO-ს გარშე), DL MU გადაცემისათვის და UL MU გადაცემისათვის. ეს ოთხი განსხვავებული ფრეიმის ტიპი ახდენს საბაზისო ფრეიმის სტრუქტურის გაფართოებას,

შერჩეული ველებით, რომლებიც სპეციალიზებულია სხვადასხვა ფრეიმის ტიპებისთვის (იხ. სურათი 3).



სურათი 3. 802.11ax-ის PHY ფრეიმის ფორმატი: L (legacy) - მემკვიდრეობითი, STF (Short Training Field) – ტრენინგის მოკლე ველი, LTF (Long Training Field) – ტრენინგის გრძელი ველი, RL-SIG (Repetition L-SIG) – L სიგნალის გამეორება, A -აუცილებელი ველი, B - ოპციური ველი, Data - მონაცემები, Extension - გაფართოება.

ფრეიმის ყველა ამ ტიპისათვის ხორციელდება პრეამბულის დუბლირება გადასაცემად განკუთვნილი სიხშირული ზოლის ყოველ 20 მჰც-იან ქვეარხში და ის შედგება ორი ნაწილისაგან: 802.11ax-მდე არსებული და მემკვიდრეობით მიღებული ნაწილისაგან (Legacy part) და ახალი მაღალი ეფექტურობის ნაწილისაგან (High Efficiency (HE) part) (იხ. სურათი 4). მაშინ როდესაც პირველი გამოიყენება უკუთავსებადობისათვის, მეორე უზრუნველყოფს გადაცემას 802.11ax-ში შემავალი ახალი მოწყობილობების გამოყენებით და ის შეიძლება დეკოდირებულ იქნას მხოლოდ 802.11ax მოწყობილობებით.



სურათი 4. მემკვიდრეობითი პრეამბულა (Legacy preamble) და 802.11ax-ის პრეამბულა.

მემკვიდრეობითი ნაწილი შეიცავს ტრენინგის ველებს, რომლებიც ახდენენ გადამცემისა და მიმღების სინქრონიზაციას და მემკვიდრეობითი სიგნალის ველს (L-SIG), რომელიც აღწერს პარამეტრებს ფრეიმის დანარჩენი ნაწილისათვის. კერძოდ, L-SIG საშუალებას იძლევა გამოანგარიშდეს ფრეიმის ხანგრძლივობა. მიუხედავად იმისა, რომ მემკვიდრეობითი ნაწილის მოწყობილობები ახდენენ ფრეიმის დანარჩენი ნაწილის დეკოდირებას შეცდომებით, ისინი არხს მიიჩნევენ როგორც დაკავებულს, იმ შემთხვევაშიც კი თუ სიგნალის სიმძლავრე ძალიან დაბალია.

802.11ax ფრეიმის დეტექტირების გასამარტივებლად, მაღალი ინტერფერენციების შემთხვევაში, პრეამბულის HE ნაწილი იწყება L-SIG ველის გამეორებით, რასაც მოჰყვება სავალდებულო HE-SIG-A ველი, ოპციური HE-SIG-B ველი და ტრენინგის ველები (HE-STF და HE-LTF) რომლებიც საჭიროა MIMO-ს მომართვისათვის.

ახლა განვიხილოთ HE-SIG-A და HE-SIG-B ველები უფრო დეტალურად. HE-SIG-A აწვდის ინფორმაციას მოდულაცია-კოდირების სისტემაზე, სიხშირული ზოლის სიგანეზე, სივრცით ნაკადების რაოდენობაზე და სხვა პარამეტრებზე, რომლებიც საჭიროა ფრეიმის დანარჩენი ნაწილის სწორად დეკოდირებისათვის. TGax განაგრძობს MAC-ის სიგნალური ნაწილის ელემენტების გადატანას PHY პრეამბულაში. ასეთი მიდგომა ფართოდ არის

გამოყენებული დაწყებული 802.11ah-დან. ვინაიდან, პრეამბულას აქვს საკმაოდ ხისტი სტრუქტურა და იგი გადაცემულია ყველაზე უფრო პრიმიტიული მოდულაცია-კოდირების სისტემის გამოყენებით, ასეთი დამატებითი ინფორმაციის ღირებულება მაღალია.

ვინაიდან 802.11ax ქსელები განკუთვნილია როგორც შენობის შიგნით ასევე შენობის გარეთ განთავსებისათვის, გადაცემები მიდრეკილია დოპლერის ეფექტისკენ, რაც ძირითადად გამოწვეულია სწრაფად მოძრავი ობიექტებიდან, როგორცაა მანქანები და მატარებლები, სიგნალების არეკვლის გამო. მაღალი მობილობის პირობებში ფუნქციონირების გასაუმჯობესებლად, 802.11ax გვთავაზობს პერიოდულად ჩასვით PHY-ში პაკეტის დატვირთვის საცნობარო სიგნალი, მაგ., HE-LTF ველის ასლები. ამ საცნობარო სიგნალების წყალობით, არხი შეიძლება შეფასდეს არა მხოლოდ პაკეტის პრეამბულის მიღების დროს, არამედ მუდმივად მთელ პაკეტის მიღების განმავლობაში, რაც ძალიან ნაყოფიერია მაღალსიჩქარიანი კომუნიკაციებისთვის, ანუ, როდესაც არხი სწრაფად ცვალებადია.

ისეთი არხის გამოყენების შემთხვევაში, რომლისთვისაც ზოლი ≥ 40 მჰც-ზე, HE-SIG-A ველი დუბლირდება თითოეულ 20 მჰც-იან ქვეარხზე. SU ფრეიმების გაფართოებული დიაპაზონის ვარიანტში, HE-SIG-A-ის გამეორება ხდება დამატებითი ბიტების ინტერლივინგის პროცედურის შემდეგ.

როგორც UL და DL SU გადაცემის შემთხვევაში, ასევე UL MU გადაცემის შემთხვევაში, ყველა საჭირო ინფორმაცია შეიძლება მოთავსდეს HE-SIG-A-ში, რომელიც შედგება მემკვიდრეობის ნაწილის ორი OFDM სიმბოლოსაგან. ამასთან, DL MU გადაცემის შემთხვევაში, სხვადასხვა მომხმარებლისთვის ინფორმაცია შეიძლება განსხვავდებოდეს და თითოეული მათგანისთვის ცალკე უნდა იყოს მითითებული. ამ შემთხვევაში, ცვლადი სიგრძის დამატებითი HE-SIG-B ველი შედის ფრეიმის პრეამბულაში. კერძოდ, ველი შეიცავს ორ ბლოკს: ერთს საერთო და ერთს კონკრეტული მომხმარებლის შესახებ ინფორმაციას. საერთო ბლოკში აღწერილია OFDMA რესურსების გამოყოფა, ხოლო კონკრეტული მომხმარებლის ბლოკი შედგება რამდენიმე ქვეველისაგან, რომლებიც განსაზღვრავენ თითოეული რესურსული ერთეულისთვის მის მოდულაცია-კოდირების სისტემას, სივრცითი ნაკადების რაოდენობას და ა.შ.

HE-STF და HE-LTF ველები გამოიყენება MIMO-თვის. კერძოდ, HE-STF ველის ძირითადი დანიშნულებაა MIMO გადაცემისას გაძლიერების ავტომატური რეგულირების შეფასების გაუმჯობესება, ხოლო HE-LTF ველები მიმღებისთვის იძლევიან საშუალებას, რომ შეაფასოს MIMO არხი კონსტელაციის ამსახველ გამოსავლელ მოწყობილობებს და მიმღებ მოწყობილობებს შორის.

მემკვიდრეობითი PHY პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკის მსგავსად, მონაცემთა ველი შეიცავს სიგნალის (SIG) ქვეველს, რომელიც საჭიროა კოდირების/დეკოდირების სკრემბლერის და კოდირებული MAC ფრეიმის ინიციალიზაციისათვის. მონაცემთა ველი გადაეცემა 4-ჯერ მეტი სიგრძით ვიდრე ეს საჭიროა OFDM სიმბოლოებისათვის.

სიმბოლოების ხანგრძლივობის ოთხჯერ გაზრდა გულისხმობს მიმღების მხარეს 4-ჯერ მეტ გაანგარიშებას, მაშინ როდესაც მიმღებისათვის დროის მონაკვეთი, რომლის განმავლობაშიც მან უნდა გააკეთოს ასეთი გამოთვლები უკან დასტურის გაგზავნის ან გამოძახილის გაგზავნის წინ, შემოიფარგლება SIFS-ით. ამან შეიძლება პრობლემები შეუქმნას იაფფასიან Wi-Fi მოწყობილობებს, რომლებიც ვერ შეძლებენ დროულად აგენერირონ დასტურის შეტყობინებას. პრობლემის პირდაპირი გადაწყვეტა - SIFS-ის გაზრდა, არ იქნა მიღებული, უკუთავსებადობასთან დაკავშირებული სიმძნელების გამო და იმის გამოც რომ შემცირდებოდა არხის გამოყენების ეფექტურობა. ამის ნაცვლად, TGax უზრუნველყოფს ფრეიმის კუდის გახანგრძლივების შესაძლებლობას სპეციალური გაფართოების ველის (Extension) ჩასმით. იმისათვის, რომ მოხდეს თავსართისათვის ამ

გაფართოებით გამოწვეული დანახარჯის მინიმიზაცია მისი ხანგრძლივობა მოქნილია და დამოკიდებულია როგორც მიმღებისათვის განკუთვნილ ფრეიმზე, ასევე სასარგებლო დატვირთვის ზომაზე. კერძოდ, თითოეული STA, როდესაც აცხადებს თავის შესაძლებლობებს, მიუთითებს რომელი მაქსიმალური გაფართოებაა საჭირო (0, 8 მკწმ თუ 16 მკწმ) რათა ფრეიმი დამუშავდეს მოცემული მოდულაცია-კოდირების სისტემით და სივრცითი ნაკადების რაოდენობით. აღვნიშნოთ, რომ ეს მნიშვნელობა შეიძლება შემცირებული იქნას, თუ კოდირებული სასარგებლო დატვირთვა არ იყოფა OFDM სიმბოლოს ზომაზე და, ამგვარად, ბოლო OFDM სიმბოლო შეიცავს შევსებას ნულებით. ასეთ შემთხვევაში მიმღებს ჭირდება ნაკლები დრო რათა მოახდინოს ასეთი შემცირებული OFDM სიმბოლოდან მიღებული ბიტების დეკოდირება. კერძოდ, ასეთ შემთხვევაში OFDM-ის ბოლო სიმბოლო იყოფა თანაბარი ზომის 4 სეგმენტად და გაფართოება შეიძლება შემცირდეს მაქსიმალური მოთხოვნილი მნიშვნელობიდან რიცხვით, რომელიც ტოლია ცარიელი სეგმენტების რაოდენობის და 4 მკწმ-ს ნამრავლის.

7. OFDMA-ს გამოყენება 802.11ax-ში

ვინაიდან OFDMA-ს შემუშავება 802.11ax ქსელებისათვის წარმოადგენს არატრივიალურ ამოცანას, შემოთავაზებული იქნა ამ ამოცანის გადაჭრის მრავალი მიდგომა. საბოლოოდ, TGax-მა შეიმუშავა ძალზე მოქნილი და ეფექტური მიდგომა, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც დეტერმინირებული, ასევე შემთხვევითი დაშვებისათვის. გავიხილოთ დეტალურად ეს მიდგომა.

802.11ax-ში არხის რესურსები განაწილებულია დროისა და სიხშირის მიხედვით, მაგრამ იმისათვის, რომ გამარტივდეს რესურსების მართვა და მოწყობილობების ფუნქციონირება და ასევე შენარჩუნდეს თავსებადობა უკვე არსებულ მოწყობილობებთან OFDMA გადაცემა ორგანიზებულია ფრეიმების მიხედვით. ეს ნიშნავს, რომ ფრეიმს შეუძლია გადაიტანოს ინფორმაცია მრავალი STA-დან ან მრავალი STA-კენ. ასეთ ფრეიმში, სხვადასხვა ტონები განკუთვნილი არიან სხვადასხვა STA-ებისათვის, მაგრამ ყველა RU-ს ხანგრძლივობა თითოეული ასეთი ფრეიმის შიგნით ერთნაირია. RU შეიძლება შეიცავდეს 26, 52, 106, 242, 484, 996 ან 2×996 ტონს (სამსახურებრივი ტონების ჩათვლით). აღვნიშნავთ, რომ თითოეული ტონი წარმოადგენს ერთ ქვეგადამტანს 78.125 კჰც ზოლით. მთლიანი 20 მჰც ზოლი, 40 მჰც ზოლი, 80 მჰც ზოლი და $80+80$ (160) მჰც ზოლი, შეესაბამება 242 ტონის შემცველ RU-ს, 484 ტონის შემცველ RU-ს, 996 ტონის შემცველ RU-ს, და ორ 996 ტონის შემცველ RU-ს, შესაბამისად. ერთი ფართო RU შეიძლება დაიყოს ორ დაახლოებით ორჯერ ვიწრო RU-ებად. თავის მხრივ, თითოეული მათგანი შეიძლება ისევე დაყოფილ იქნას ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად. ერთადერთი გამონაკლისია 242 ტონის შემცველი RU, რომელიც შეიძლება შეიცვალოს ორი 106 ტონის შემცველი RU-თი და ერთი 26 ტონის შემცველი RU-თი. თითოეული ზოლისათვის RU-ების მაქსიმალური რაოდენობა მოცემულია მე-2 ცხრილში. MU-MIMO-ს გამოყენებით რვამდე მომხმარებელი შეიძლება განეკუთვნოს ერთ RU-ს. ასევე შესაძლებელია ოთხამდე სივრცითი ნაკადი განაწილდეს ერთ მომხმარებელზე, თუ სივრცითი ნაკადების ჯამური რაოდენობა არ აღემატება რვას.

ახლა განვიხილოთ, თუ როგორ არის ორგანიზებული DL და UL OFDMA გადაცემები. DL OFDMA გადაცემის შემთხვევაში საერთო პრეამბულის HE-SIG-B ველი შეიცავს RU-ების განაწილების რუკას, რომელსაც მოსდევს თითოეული მომხმარებლის კონტენტის ველები, რომლებიც აღნიშნავენ იმ RU-ებს, რომლებიც განსაზღვრული უნდა იყოს კონკრეტული STA-თვის და გადაცემის პარამეტრებს, რომლებიც გამოყენებული უნდა იყოს ამ STA-ს მიერ (სივრცითი ნაკადების რაოდენობა, მოდულაცია-კოდირების სქემა და ა.შ.). აღვნიშნოთ, რომ RU-ს შეუძლია წარმოადგინოს ან SU ან MU-MIMO

განაწილება. უკანასკნელ შემთხვევაში სივრცითი კონფიგურაცია ასევე უნდა იყოს განსაზღვრული და მიწოდებული STA-თვის.

RU type	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 (80+80) MHz
26-tone	9	18	37	74
52-tone	4 ⁺¹	8 ⁺²	16 ⁺⁵	32 ⁺¹⁰
106-tone	2 ⁺¹	4 ⁺²	8 ⁺⁵	16 ⁺¹⁰
242-tone	1	2	4 ⁺¹	8 ⁺²
484-tone	NA	1	2 ⁺¹	4 ⁺²
996-tone	NA	NA	1	2

ცხრილი 2. თითოეული სიხშირული ზოლისათვის RU-ების მაქსიმალური რაოდენობა. Nⁿ ნიშნავს „პლუს n 26 ტონის შემცველი RU“.

UL MU გადაცემის ორგანიზება უფრო რთული ამოცანაა. MU გადაცემა Wi-Fi- ში სინქრონიზდება დროის დომენში. იმის გამო, რომ ძნელია მკაცრი დროითი სინქრონიზაციის შენარჩუნება, AP კოორდინაციას უწევს UL MU გადაცემას შემდეგნაირად. AP გადასცემს საკონტროლო ფრეიმის ახალ ტიპს - ტრიგერის ფრეიმს - რომელშიც მოცემულია მოახლოებული UL MU გადაცემის საერთო პარამეტრები (ხანგრძლივობა, დამცავი ინტერვალი (GI) - რაც ერთი და იგივე იქნება ყველა იმ STA-სთვის, რომელზეც მონაწილეობს UL MU გადაცემაში). AP ასევე გამოყოფს RU-ს STA-სთვის და განსაზღვრავს გადაცემის პარამეტრებს თითოეული კონკრეტული STA-სთვის (მოდულაცია-კოდირების სქემა და სხვა). იმისათვის, რომ მიღწეული იქნას სინქრონიზაცია, MU გადაცემა ხორციელდება დაუყოვნებლივ, ანუ SIFS-ში, რომელიც მოსდევს ტრიგერის ფრეიმს. თუ გავითვალისწინებთ, რომ UL გადაცემისთვის მზადებამ შეიძლება დაიკავოს უფრო მეტი დრო, ვიდრე ეს SIFS-ის ხანგრძლივობაა, AP-ს შესაძლებლობა აქვს ჩაამატოს ტრიგერის ფრეიმი.

UL MU OFDMA გადაცემისათვის, AP მიიღებს სიგნალებს სხვადასხვა STA-სგან თითქმის ერთნაირი სიმძლავრის დონით. ამისათვის, 802.11ax განსაზღვრავს სიმძლავრის წინასწარი კორექტირების მექანიზმს, რომლის თანახმად, AP მიუთითებს ტრიგერის ფრეიმში მისი მიმდინარე გადამცემის სიმძლავრეს და მიზნობრივი სიგნალის დონეს, რომელსაც AP ელოდება მიიღოს STA-დან შემდგომი UL გადაცემის დროს. ამრიგად, იცის რა AP-ს გადაცემის სიმძლავრე და მიღებული ტრიგერის ფრეიმის სიგნალის დონე, STA-ს შეუძლია შეაფასოს AP-თვის დანაკარგები ტრასაზე და მას შეუძლია გამოითვალოს შესაბამისი გადაცემის სიმძლავრე შემდგომი UL გადაცემისთვის. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ რადგან AP (და არა STA!) ირჩევს მოდულაცია-კოდირების სქემას UL გადაცემებისთვის, თითოეული STA ასევე შეიცავს ინფორმაციას მისი UL პოტენციური ენერგეტიკული შესაძლებლობების შესახებ, ანუ სხვაობას მის მაქსიმალურ გადაცემის სიმძლავრესა და მის მიმდინარე გადაცემის სიმძლავრეს შორის, რომელიც საჭიროა მისთვის განკუთვნილი მოდულაცია-კოდირების სქემისათვის.

8. გადაფარვის მართვა და სივრცის განმეორებითი გამოყენება 802.11ax-ში

მჭიდრო განთავსებასთან დაკავშირებულ პრობლემებთან დაკავშირებით, TGax ერთის მხრივ შეეცადა შეემცირებინა ქსელებს შორის ინტერფერენციები და მეორეს მხრივ უზრუნველყო სივრცის განმეორებითი გამოყენების შესაძლებლობა, რაც ნიშნავს

ერთდროულ გადაცემებს გადაფარულ ქსელებში და რაც ზრდის მთლიან გამტარუნარიანობას.

იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ რომელი BSS არის ფრეიმის შემქმნელი, ისე რომ არ მოხდეს მთლიანი ფრეიმის დეკოდირება 802.11ax იყენებს BSS-ის არაუნიკალურ ID-ს, რომელსაც უწოდებენ BSS-ს ფერს და რომელიც გადაიცემა ფრეიმის პრეამბულაში. თავდაპირველად BSS ფერის ველი შეიცავდა 3 ბიტს, რომელიც პირველად გამოყენებული იყო 802.11ah-ში. მიზანი იყო სიმძლავრის მოხმარების შემცირება, ვინაიდან მიმღებს შესაძლებლობა ეძლეოდა შეეწყვიტა იმ ფრეიმის დეკოდირება, რომელიც მოდიოდა უცხო BSS-დან. ვინაიდან BSS-ის ფერი არჩეულია შემთხვევითი წესით AP-ს მიერ, 802.11ax-ში ორი მეზობელი BSS-ს ფერები შესაძლებელია ემთხვეოდეს ერთმანეთს ან შევიდნენ კონფლიქტში ერთმანეთთან. იმისათვის რომ შემცირებულიყო BSS-ს ფერების კონფლიქტის ალბათობა, TGax დათანხმდა გაეზარდა BSS-ის ფერის ველის სიგრძე 6 ბიტამდე. კონფლიქტის წარმოშობის შემთხვევაში STA-ებს, რომლებიც დაკავშირებულია AP-თან შეუძლიათ აცნობონ მათ კონფლიქტის შესახებ, და AP-მ შეიძლება დაიწყოს BSS-ს ფერის შეცვლის პროცედურა. ამისათვის ის აცხადებს მომავალ BSS ფერს და დროს როდესაც ფერი უნდა შეიცვალოს სპეციალური საინფორმაციო ელემენტის გადაცემის გზით. ამგვარად, ყველა STA-ს შეუძლიათ მიიღონ ინფორმაცია BSS ფერის შეცვლის შესახებ. შესაბამისად, ფერის მინიჭება საშუალებას აძლევს მოწყობილობებს რათა განასხვავონ გადაცემის პროცესები მათი საკუთარი ქსელიდან და მეზობელი ქსელებიდან.

სიმძლავრის და მგრძობელობის ადაპტიური ზღვრუბლები შესაძლებლობას იძლევიან დინამიურად არეგულირონ გადაცემის სიმძლავრე და სიგნალის აღმოჩენისთვის დაწესებული ზღვრუბლი, რათა გაიზარდოს სივრცის ხელმეორედ გამოყენების ეფექტურობა. აღსანიშნავია, რომ სივრცის ხელმეორედ გამოყენების შესაძლებლობების გარეშე მოწყობილობები უარს აცხადებენ გადასცენ ინფორმაცია ერთდროულად იმ გადაცემებთან რომლებიც მიმდინარეობს მეზობელ ქსელებში. ფერის გამოყენებით უსადენო გადაცემა ფიქსირდება დასაწყისშივე, რაც ეხმარება გარშემო მყოფ მოწყობილობებს გადაწყვიტონ, შესაძლებელია თუ არა უსადენო გარემოს ერთდროული გამოყენება. STA-ს ეძლევა ნება განიხილოს უსადენო გარემო როგორც არააქტიური და დაიწყოს ახალი გადაცემა მაშინაც კი როდესაც მეზობელი ქსელიდან აღმოჩენილი სიგნალი აღემატება სიგნალის აღმოჩენის ზღვრუბლს, იმ პირობით, რომ ახალი გადაცემისათვის განკუთვნილი სიმძლავრე სათანადოდ შემცირებულია.

ორი NAV-ის გამოყენება წარმოადგენს 802.11ax-ის დამახასიათებელ თავისებურებას. W-Fi არხზე წვდომას ახორციელებს „საუბრამდე მოსმენის“ პრინციპით. ეს ნიშნავს, რომ STA ახორციელებს გადამტანის გამოცნობის პროცედურას სანამ გადასცემდეს ფრეიმს. არხი ითვლება დაკავებულად შემდეგ შემთხვევებში:

- 1) თუ გადამტანის გამოცნობის პროცესში STA აღმოაჩენს ფრეიმის პრეამბულას, ის განიხილავს არხს როგორც ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში დაკავებულს რისი სიგნალიზირებაც ხდება პრეამბულიდან.
- 2) თუ გადამტანის გამოცნობის პროცესში STA აღმოაჩენს უცნობ სიგნალს, რომელიც 20 დბმ-ით აღემატება გამოცნობის მინიმალურ ზღვრუბლს.
- 3) თუ ნაჩვენებია, რომ არხი ვირტუალურად დაკავებულია.

Wi-Fi-ში გადამტანის ვირტუალურ გამოცნობას ეწოდება NAV და ეს პროცესი ორგანიზებულია შემდეგნაირად. MAC-ის თავსართში, STA მიუთითებს NAV-ის მნიშვნელობას, ანუ რა დროის განმავლობაში შემდგომი ფრეიმების გაცვლის პროცესი დაიკავებს არხს. მოახდენენ რა ფრეიმის სწორად დეკოდირებას, სხვა STA-ები დააყენებენ NAV-ს, ანუ ისინი განიხილავენ არხს როგორც დაკავებულს მითითებული დროის განმავლობაში. თუ STA მიიღებს ფრეიმს, რომელიც მიუთითებს NAV-ის უფრო მეტ

მნიშვნელობას, ის გაზრდის მის NAV-ს, მაგრამ STA არავითარ შემთხვევაში არ შეამცირებს NAV-ის მნიშვნელობას, თუნდაც მითითებული NAV-ის მნიშვნელობა იყოს უფრო მცირე. STA მოახდენს მისი NAV-ის ანულირებას თუ ის მიიღებს კონფლიქტისაგან თავისუფალ ბოლო ფრეიმს.

802.11ax-მდე არსებულ Wi-Fi სქემებში STA-ები არ იღებდნენ მხედველობაში თუ რომელი ფრეიმით იყო დადგენილი NAV-ის მნიშვნელობა. თუმცა ამას შეიძლება მივეყვანეთ შემდგომ არასწორ ფუნქციონირებამდე. დავუშვათ, ფრეიმი ერთსა და იმავე BSS-დან ადგენს NAV-ის მნიშვნელობას STA-თვის. ამის შემდგომ STA იღებს კონფლიქტიდან თავისუფალ ბოლო ფრეიმს მასთან გადაფარულ BSS-დან. არსებული წესების თანახმად STA-მ უნდა გადატვირთოს NAV და ის ამის შემდეგ აღარ განიხილავს გარემოს, როგორც ვირტუალურად დაკავებულს. იმის გამო, რომ STA აღარ ახდენს რეაგირებას ქსელი არსებულ გადაცემაზე, რისგანაც ის დაცული იყო NAV-ის მიერ, მან შეიძლება დაიწყოს მისი პირადი გადაცემა რაც გამოიწვევს კონფლიქტს. ვინაიდან STA-ების მკვირივი განთავსება ადრე არ იყო ჩვეულებრივი სცენარი, ასეთი ვითარება ნაკლებად იყო შესწავლილი. თუმცა ეს დასაბუთება აღარ არის მართებული 802.11ax ქსელებისათვის. ამიტომ, იმისათვის რომ თავიდან იქნას აცილებული NAV-ის გადატვირთვა კონფლიქტის გარეშე ბოლო ფრეიმისაგან, რომელიც მოდის გადაფარული BSS-დან, 802.11ax-ში STA-ები მხარს დაუჭერენ ორ NAV-ს: ერთს საკუთარი BSS-სთვის, ხოლო მეორეს ყველა გადაფარული BSS-ებისთვის და ისინი ცალ-ცალკე მოახდენენ NAV-ების მოდიფიცირებას.

თანამედროვე AP-ის ერთ-ერთი გავრცელებული მახასიათებელია რამდენიმე „ვირტუალური“ AP-ს (Virtual AP, VAP) მხარდაჭერა. ეს ნიშნავს, რომ ერთ ფიზიკურ მოწყობილობას შეუძლია შექმნას მრავალი დამოუკიდებელი BSS, რაც ზოგიერთ აპარატში 32 VAP-ს აღწევს. ეს შეიძლება გამოყენებული იყოს, როდესაც, მაგალითად, მსურველს სურს Wi-Fi-ის სტუმარი ქსელის დაშორება შიდა კორპორატიული ქსელისგან ისე, რომ არ მოხდეს დამატებითი პროგრამის დაყენება. არსებული VAP-ების ერთ-ერთი ნაკლოვანება ის არის, რომ ყველა VAP-სთვის უამრავი სერვისული ინფორმაცია შეიძლება იყოს ერთი და იგივე, მაგრამ იგი თითოეულ მათგანს ცალ-ცალკე გადასცემს. 802.11ax შესწორებაში შედის მრავალჯერადი BSS იდენტიფიკატორების (BSSID) მხარდაჭერა, რაც საშუალებას იძლევა ერთი და იგივე ინფორმაციის გაგზავნა ყველა BSS-სთვის განხორციელდეს ერთდროულად, მაგ., საერთო შუქურის სიგნალის საშუალებით. მრავალჯერად BSSID-ში მყოფი ყველა BSS იყენებენ ერთი და იგივე BSS ფერს და მრავალჯერადი BSSID ნაკრებიდან BSS-ს ფრეიმები განიხილება, როგორც ინტრა-BSS ფრეიმები.

9. ელექტროენერგიით კვების მართვა 802.11ax-ში

802.11 ქსელში ელექტროენერგიით კვების მართვა ემყარება ალტერნატივას ორ მდგომარეობას შორის: გაღვიძებული და მთვლემარე. გაღვიძებულ მდგომარეობაში, STA-ს შეუძლია გადასცეს და მიიღოს ფრეიმები, ხოლო მთვლემარე მდგომარეობაში მისი რადიომოწყობილობა გამორთულია. აქტიური STA ყოველთვის გაღვიძებულია, ხოლო ენერჯის დამზოგავი (Power Saving, PS) STA მონაცვლეობს ამ მდგომარეობას შორის.

ვინაიდან AP-მ არ იცის PS STA-ს მიმდინარე მდგომარეობა, ის ახდენს ყველა იმ ფრეიმის ბუფერიზაციას (გარდა ზოგიერთისა რომელთა გადაცემაც ხდება დროის რეალურ მასშტაბში), რომლებიც განკუთვნილია მოცემული STA-თვის. PS STA-ს ბუფერული პაკეტების შესახებ ინფორმაციის მისაწოდებლად, AP შეიცავს ტრაფიკის ინდიკაციის რუკას (Traffic Indication Map, TIM) ე.წ. შუქურებში. PS STA შეიძლება დიდხანს იმყოფებოდეს დაძინებულ რეჟიმში, თუმცა დროდადრო იღვიძებს, რათა მიიღოს TIM ელემენტის შემცველი შუქურის სიგნალი. მან შეიძლება ასევე ადრე გაიღვიძოს, თუ გადასაცემი აქვს ფრეიმი. ამ შემთხვევაში, არხზე წვდომის დაწყებამდე,

STA უნდა დაელოდოს ფრეიმის მიღებას. თუ შუქურა მიუთითებს, რომ STA-სთვის ბუფერული პაკეტი არ არის განკუთვნილი, ის ბრუნდება მთვლემარე მდგომარეობაში. წინააღმდეგ შემთხვევაში, STA აგზავნის PS-გამოკითხვის ფრეიმს. PS-გამოკითხვაზე გამოხმაურების მიღების შემდეგ, AP აგზავნის ბუფერულ ფრეიმებს.

მიუხედავად იმისა, რომ აღწერილი კონცეფცია საკმაოდ მარტივია, იგი შექმნილი იყო საკმაოდ დაბალი დატვირთვისთვის და მორგებული იყო შემთხვევითი წვდომისთვის. 802.11ax-ის მკვრივი ქსელებისათვის დამახასიათებელ სცენარში, ტრაფიკის მაღალი დატვირთვით და ენერჯით შეზღუდული სმარტფონებისა და ლეპტოპების დიდი რაოდენობით, 802.11-ის წინა ვერსიებიდან მემკვიდრეობით მიღებული ენერჯის დაზოგვის მექანიზმები არაეფექტურია. პირველ რიგში, მოწყობილობები შეიძლება დაეკიდონ, ანუ PS STA-ები შეიძლება დარჩნენ გაღვიძებულ მდგომარეობაში დიდი ხნის განმავლობაში, როდესაც ტრაფიკი გადაეცემა სხვა STA-ებს. მეორე, AP ვერ შეძლებს ტრაფიკის მიწოდებას გამოკითხვის გარეშე. მესამე, PS-გამოკითხვები იძლევიან მხოლოდ SU გადაცემების შესაძლებლობას, რაც MU გადაცემებზე ნაკლებად ეფექტურია. დაბოლოს, PS-გამოკითხვებით გამოწვეული თავსართი შედარებით დიდია. დღეს მოქმედი სტანდარტი ასევე შეიცავს რამდენიმე მეთოდს, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია წინასწარ დაიგეგმოს მომსახურების პერიოდები, როდესაც PS STA-ებს შეუძლიათ გადასცენ ან ამოიღონ ბუფერში განთავსებული პაკეტები მიღება AP-დან. ეს მეთოდები ღრმად არის დაკავშირებული არხთან დაშვების ჰიბრიდულად მართვად ფუნქციონირებასთან, რომელიც არ არის რეალიზებული მზა მოწყობილობებში. ამის გარდა, ეს მეთოდები არ არის შესაფერისი OFDMA გადაცემისათვის.

TGax-ის მიერ შემუშავებული გაუმჯობესების მთავარი იდეა არის ის, რომ მხოლოდ მოქმედი STA-ს გადამცემი/მიმღები უნდა იყოს გაღვიძებულ მდგომარეობაში, ხოლო ყველა სხვა STA-მა შეიძლება გამორთოს თავისი რადიოკავშირი. ეს შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი გზით. პირველი, 802.11ax STA-ები შეიძლება დარჩნენ ე.წ. მიკროძილის რეჟიმში, ანუ მათ შეუძლიათ გამორთონ თავიანთი რადიო ინტერფეისი ზოგიერთი გადაცემის დროს, როდესაც ისინი ვერ იქნებიან ჩართულები ფრეიმების გაცვლის პროცესში. მეორე, TGax იყენებს მიზნობრივი ობიექტის გაღვიძების დროს (TWT) მექანიზმს, რომელიც შექმნილია მომსახურების პერიოდების დაგეგმისათვის და ის არ საჭიროებს არხთან დაშვების ჰიბრიდულად მართვად ფუნქციონირებასთან დაკავშირებული რთული პროცედურების გამოყენებას.

მიკროძილის მიდგომა დაინერგა 802.11ac-ში. ამ ვერსიაში PHY სათაური შეიცავს ინფორმაციას, რომელიც მიუთითებს ფრეიმში მონაწილე გადამცემს(ებს) და მიმღებს(ებს). ამრიგად, ყველა სხვა STA-ს შეუძლია ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში მთვლემარე მდგომარეობაში გადასვლა. 802.11ax აწვითარებს ამ იდეას, საშუალებას აძლევს STA-ს იყოს მთვლემარე მდგომარეობაში UL გადაცემის ხანგრძლივობის განმავლობაში ან სხვა STA-ს გადაცემის შესაძლებლობის გაჩენის შემთხვევაში (Transmission Opportunity, TXOP) იმავე BSS-ში. ამისათვის HE-SIG-A ველი შეიცავს ისეთ ინფორმაციას, როგორცაა BSS ფერი, TXOP-ის დარჩენილი ხანგრძლივობა, გადაცემის მიმართულება (UL ან DL) და ა.შ. კერძოდ, თუ ფრეიმი ერთნაირი ფერისაა და ეს არის ან UL ფრეიმი ან DL MU ფრეიმი, რომელიც არ არის განკუთვნილი მოცემული STA-თვის, STA-ს შეუძლია დარწმუნდეს, რომ მას არ გადაეცემა რაიმე ფრეიმი TXOP-ის ბოლომდე და მას შეუძლია გადასვლა მთვლემარე მდგომარეობაში.

იმისათვის, რომ თავიდან იქნას აცილებული ან მოხდეს STA-ებს შორის კონფლიქტების მინიმიზაცია და ასევე შემცირდეს მოხმარებული ენერჯია, TGax-ის მიერ გაუმჯობესებული იქნა TWT მექანიზმი, რომელიც პირველად შემოტანილი იყო 802.11ah-ში. ეს სტანდარტი ახდენს Wi-Fi-ის ადაპტაციას საგანთა ინტერნეტის სცენარებთან და

მომთხოვნებთან. TWT საშუალებას აძლევს STA-ს, რომელსაც ეწოდება TWT-ს მომთხოვნი STA, პერიოდულად დაუკავშირდეს სხვა STA-ს ან AP-ს, რომელსაც ეწოდება TWT-ს მარეაგირებელი STA, როდესაც TWT-ს მომთხოვნი STA იღვიძებს გარკვეული პერიოდის განმავლობაში (ეწოდება TWT-ს მომსახურების პერიოდი, ანუ TWT Service Period, TWT SP) და ცვლის ფრეიმებს TWT-ს მარეაგირებელ STA-თან. ამ მექანიზმის წყალობით, TWT-ს მომთხოვნი STA-ს შეუძლია იმყოფებოდეს მთვლემარე მდგომარეობაში, გარდა TWT SP ინტერვალებისა. შესაბამისად, AP-თან TWT SP-ების დამყარებით, STA აღარ საჭიროებს გაღვიძებას თუნდაც შუქურისთვის, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს ელექტროენერჯის მოხმარება.

802.11ax-თვის შემუშავებული მომხმარებელი ელექტროენერჯის დაზოგვის ზემოთ ჩამოთვლილი და ასევე სხვა მექანიზმები უზრუნველყოფენ ბატარეით კვებაზე დაფუძნებული მოწყობილობების სიცოცხლის ხანგრძლივობის მნიშვნელოვან ზრდას.