



საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

რამინი კუჭუხიძე

აეროპორტების ზონაში რადიოსანავიგაციო სისტემებზე
ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედების კვლევა საჰაერო
ხომალდების დაფრენის უსაფრთხოების გაუმჯობესების მიზნით

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამის დასახელება და კლასიფიკატორის შიფრი
„საჰაერო ტრანსპორტის ექსპლუატაცია და ტექნოლოგიები 0716“

თბილისი

2026 წელი

სადისერტაციო ნაშრომის ანოტაცია

სადისერტაციო კვლევა ეძღვნება ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS – Instrument Landing System) საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების (შემდგომში ე.მ.) ზემოქმედებას. კვლევის მიზანია ე.მ. ხელშეშლების იდენტიფიცირება, კლასიფიკაცია და ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების შეფასება, რომლებიც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საკურსო რადიოშუქურის რადიომიმღების სიზუსტისა და საიმედოობის უზრუნველყოფისთვის საჰაერო ხომალდის უსაფრთხოდ დაფრენისას.

ნაშრომის თეორიულ ნაწილში წარმოდგენილია ILS-LOC-ის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მახასიათებლები, მათი გადაცემის, საჰაერო ხომალდის საბორტო რადიომიმღების მიერ მათი აღქმისა და ჰორიზონტალურ სივრცეში მათი რეაგირების ფუნქციონალური მოდელები.

დეტალურადაა გაანალიზებული სიხშირულად მოდულირებული (FM) რადიომაუწყებლობის რადიოგადამცემი სადგურებიდან ინტერმოდულაციური პროდუქტების წარმოქმნის და მათი ზემოქმედების მექანიზმები ILS-LOC რადიომიმღებზე. ეს პროდუქტები ფორმირდება მაშინ, როდესაც ორი ან მეტი ძლიერი სიგნალი იწვევს სანავიგაციო რადიომიმღების არაწრფივ რეჟიმში გადაყვანას, რის შედეგადაც სანავიგაციო რადიომიმღებში წარმოიქმნება მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება.

წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების შესაფასებლად შემუშავებული ფუნქციური მოდელი დეტალურად აღწერს რადიოგადამცემისა და რადიომიმღების მუშაობის პრინციპებს, ასევე 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების ფორმირებისა და სივრცითი მოდულაციის მექანიზმებს.

სიხშირულად მოდულირებულ (FM) რადიომაუწყებლობასა (87–108 მჰც) და საკურსო რადიოშუქურას (108.1–111.95 მჰც) შორის, ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (EMC) პრინციპებიდან გამომდინარე, კონკრეტულად, დამცავი სიხშირული ზოლის არარსებობის გამო, სადისერტაციო ნაშრომში გამოკვლეულია

სამაუწყებლო სიგნალის სიმძლავრის დონის მიერ სანავიგაციო რადიომიმღების შესასვლელში წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლისას გამოვლენილი ე.მ. თავსებადობის პარამეტრების შესაძლო დარღვევები.

დეტალურად არის წარმოდგენილი მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) სიგნალების წარმოქმნა და ზემოქმედება ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე, რისთვისაც შექმნილია ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების მათემატიკური სცენარები. ეს სცენარები აჩვენებს, თუ როგორ იწვევს ინტერმოდულაცია მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობის (DDM) ცვლილებას.

DDM-ის ეს ცვლილება იწვევს საჰაერო ხომალდის პოზიციის ცდომილებას და კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) არასწორ ფუნქციონირებას, რაც უდიდეს საფრთხეს უქმნის საჰაერო ხომალდის დაფრენის პროცესს, განსაკუთრებით ცუდი ხილვადობის პირობებში.

კვლევის ექსპერიმენტული ნაწილი განხორციელდა ჩეხეთის რესპუბლიკაში, ბრნოს თავდაცვის უნივერსიტეტის რადიონავიგაციის ლაბორატორიაში. ტესტირებების შედეგად შეფასდა სხვადასხვა სიმძლავრისა და სპექტრული მახასიათებლის მქონე FM სიგნალების ზემოქმედება ILS-LOC რადიომიმღებზე. [76, 75]

ექსპერიმენტულმა კვლევამ დაადასტურა ILS-LOC რადიომიმღების მაღალი მგრძობელობა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის მიმართ. სანავიგაციო რადიომიმღები რეაგირებს ძალზე დაბალი დონის სიგნალებზეც კი (დაახლოებით -99 დბ/მვ (დეციბელი მილივატთან მიმართებით)), რაც იწვევს საჰაერო ხომალდის კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) არასწორ ფუნქციონირებას ან გაუმართაობის სიგნალის გააქტიურებას.

FM სამაუწყებლო სადგურების მაღალი სიმძლავრე და მათი სიხშირული სიხლოვე ILS-LOC-ის სიხშირესთან საფრთხეს უქმნის სისტემის საიმედოობას, რაც განსაკუთრებით მწვავედება სიხშირული დაცვითი ზოლის არარსებობის პირობებში.

სადისერტაციო ნაშრომში გამოკვლეულია საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების (EMI) ზემოქმედება, კერძოდ, დადგინდა ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის სიგნალის

სიმპლავრის ზღვრული მნიშვნელობები და სასურველი და არასასურველი სიგნალების სიმპლავრებს შორის დაცვის თანაფარდობები.

მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების საფუძველზე შემუშავებულია ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ახალი შედეგობრივი კლასიფიკაცია და რეკომენდაციები საჰაერო ხომალდების უსაფრთხოდ დაფრენის უზრუნველსაყოფად.

Abstract

Doctoral research investigates the impact of electromagnetic interference (EMI) on the radio receiver of the localizer component (ILS-LOC) of the Instrument Landing System (ILS). The study aims to identify, classify, and assess EMI effects that are critical to ensuring the accuracy and reliability of the localizer during safe aircraft landing.

The theoretical part describes the characteristics of ILS-LOC navigational tonal signals, their transmission and reception mechanisms, and functional models of their horizontal guidance behavior. Particular attention is given to the generation of intermodulation products from frequency-modulated (FM) broadcasting transmitters and their impact on the ILS-LOC receiver. When strong FM signals drive the receiver into a nonlinear operating mode, third-order intermodulation distortion (IMD3) is generated, leading to degradation of navigational performance.

A functional and mathematical model of EMI impact is developed, describing the formation and spatial modulation of the 90 Hz and 150 Hz navigational tones and demonstrating how intermodulation causes variations in the Difference in Depth of Modulation (DDM). These variations result in aircraft position errors and incorrect operation of the Course Deviation Indicator (CDI), posing a serious risk during landing, especially under poor visibility conditions.

The research also examines electromagnetic compatibility (EMC) issues arising from the absence of a protective frequency guard band between FM broadcasting services (87–108 MHz) and the ILS-LOC band (108.1–111.95 MHz). The research also addresses electromagnetic compatibility (EMC) issues caused by the absence of a protective frequency guard band between FM broadcasting services (87–108 MHz) and the ILS-LOC band (108.1–111.95 MHz). Experimental investigations were conducted in a radio navigation laboratory.

Experimental results confirm the high sensitivity of ILS-LOC receivers to EMI, with interference levels as low as approximately -99 dBm causing CDI malfunction or failure indications. Based on theoretical and experimental findings, threshold EMI levels, protection

ratios between desired and undesired signals, and a new classification of EMI effects on ILS-LOC receivers are proposed, along with recommendations to enhance landing safety.

სარჩევი:

ნახაზების ნუსხა:.....	9
ცხრილების ნუსხა:.....	12
აბრევიატურების ნუსხა:.....	13
შესავალი.....	15
თავი 1. არსებული ბიბლიოგრაფიული მასალის მიმოხილვა და ანალიზი.....	26
1.1 ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მოქმედი ე.მ. ხელშემშლის კატეგორიები.....	26
1.2 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე მოქმედი ე.მ. ხელშემშლის ფორმები.....	32
თავი 2. საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ფუნქციონალური მოდელი.....	45
2.1 ხელსაწყობის მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) შემადგენელი კომპონენტები....	45
.....	45
2.2 საკურსო რადიოშუქურის მოქმედების ზონა.....	47
2.3 ხელსაწყობის მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) კატეგორიები.....	48
2.4 ამპლიტუდური მოდულაცია ორმაგი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით AM (DSB-SC), როგორც ILS-LOC-ის ფუნქციონირების ძირითადი ტექნოლოგია.....	49
2.5 ხელსაწყობის მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიოგადამცემი და სივრცითი მოდულაცია.....	55
2.5.1 საჰაერო ხომალდის ჰორიზონტალური კოორდინაციის განსაზღვრის სისტემა.....	60
.....	60
2.5.2 საკურსო რადიოშუქურის ანტენის არასასურველი გვერდითი გამოსხივების გადამფარავი სიგნალისა და საკურსო სიგნალის გამოსხივება.....	62
2.6 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) პარამეტრების ნორმები ICAO-ს მიხედვით...	65
2.7 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღები.....	67

2.8 ელექტრომაგნიტური თავსებადობა სიხშირულად მოდულირებულ რადიო მაუწყებლობასა და საკურსო რადიომუქურას შორის (ILS-LOC).....	72
2.8.1 თავისუფალ სივრცეში სამაუწყებლო სიგნალის ე.მ. ველის დაძაბულობის გამოთვლა.....	74
2.8.2 საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში შემავალი სასურველი და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა	74
2.8.3 ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების შეფასების მოქმედი კრიტერიუმები საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებისთვის	77
2.8.4 სასურველი და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა ILS-LOC-ის რადიომიმღების ანტენაზე.....	82
2.9 ინტერმოდულაციური დამახინჯების წარმოქმნა ILS-LOC-ის რადიომიმღებში	85
თავი 3. ინტერმოდულაციური ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედება საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე.....	91
3.1 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში	92
3.2 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) ზემოქმედების მათემატიკური სცენარები	97
3.2.1 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება (IMD3) CSB სიგნალში	100
3.2.2 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ზემოქმედება SBO (DSB-SC) სიგნალზე	102
3.2.3 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში მოდულაციის ინდექსის სიდიდის ამოცნობა ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) გარეშე	103
3.3 კვლევითი ექსპერიმენტი მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებით გამოწვეული ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების დასადგენად საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) სანავიგაციო რადიომიმღებზე.....	105
3.3.1 პირველი კვლევითი ექსპერიმენტი: მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობების განსაზღვრა ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედებისას	113

3.4 ექსპერიმენტით გამოვლენილი ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში ინტერმოდულაციური დამახინჯების ზემოქმედება მოდულაციის ინდექსის სიდიდის ამოცნობაზე.....	123
3.4.1 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) ზემოქმედებით საჰაერო ხომალდის მდებარეობის კოორდინაციის დარღვევა	124
3.4.2 ინტერმოდულაციური დამახინჯების ზემოქმედებით სასურველი სანავიგაციო სიგნალის ფაზისა და ამპლიტუდის ცვლილებები	128
3.5 ILS-LOC სანავიგაციო მიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების შედეგობრივი კლასიფიკაცია.....	130
3.6 ILS-LOC რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების განეიტრალების მიზნით კვლევის შედეგობრივი რეკომენდაციები	132
ძირითადი დასკვნები:	135
გამოყენებული ლიტერატურა:	138

ნახაზების ნუსხა:

ნახ. 1 საჰაერო ხომალდის ფრენის ფაზები;

ნახ. 2 სანავიგაციო რადიომიმღებზე მოქმედი სასურველი სანავიგაციო და არასასურველი ხელშემლის სიგნალები;

ნახ. 3 FM მაუწყებლობისთვის განსაზღვრულ სიხშირულ ზოლსა და ILS-LOC-ისთვის განსაზღვრულ სიხშირულ ზოლს შორის დაცვითი ზოლის არარსებობა;

ნახ. 1.1 რადიოგადამცემების სასარგებლო საინფორმაციო სიგნალზე მომყოლი ჰარმონიკები და არასასურველი გამოსხივებების განაწილება;

ნახ. 1.2 სპექტრულ ანალიზატორზე დაფიქსირებული ე.მ. ხელშემლა;

ნახ. 1.3 ე.მ. ხელშემლის წარმოქმნა მომიჯნავე რადიოარხიდან;

ნახ. 1.4 ორი ფუნდამენტური სიგნალის (f_1 და f_2) არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი ინტერმოდულაციური პროდუქტები;

ნახ. 2.1.1 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) შემადგენელი კომპონენტები;

ნახ. 2.1.2 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) საკურსო რადიოშუქურა და კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი (CDI);

ნახ. 2.1.3 ნახაზზე ნაჩვენებია თუ როგორ იღებს მფრინავი ინფორმაციას ა.დ.ზ-ის მიმართ საჰაერო ხომალდის მდებარეობის შესახებ;

ნახ. 2.2.1 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის ILS სისტემისთვის განსაზღვრული მოქმედების ზონა (DOC -Designated Operational Coverage);

ნახ. 2.4.1 150 ჰც და 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები გვერდითი ზოლით და გადამტანით;

ნახ. 2.4.2 150 ჰც და 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები გვერდითი ზოლით, სადაც ჩახშობილია გადამტანი;

ნახ. 2.4.3 ამპლიტუდურად მოდულირებული სიგნალი მოდულაციის ინდექსით 0.5;

ნახ. 2.4.4 ზემოდულაცია;

- ნახ. 2.4.5 ILS-LOC-ის კურსის სექტორი;
- ნახ. 2.5.1 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიოგადამცემი;
- ნახ. 2.5.2 სანავიგაციო ტონალური სიგნალების (CSB და SBO) წარმოქმნა და მოდულაციის ინდექსთა განსაზღვრა;
- ნახ. 2.5.3 CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) და SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალების ფორმირება და ფაზური ურთიერთქმედება;
- ნახ. 2.5.4 CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალის მისაღებად გადამცემის გამარტივებული ბლოკ-სქემა;
- ნახ. 2.5.5 SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალის მისაღებად გადამცემის გამარტივებული ბლოკ-სქემა;
- ნახ. 2.5.1.1 ცენტრალური ხაზის მარჯვნივ 150 ჰც სიხშირის სიგნალი დომინირებს, მარცხნივ კი 90 ჰც სიხშირის სიგნალი;
- ნახ. 2.5.2.1 ანტენათა მასივიდან გამოსხივებული გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით (CSB);
- ნახ. 2.5.2.2 სიგნალის მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO) მიმართულების დიაგრამა;
- ნახ. 2.5.2.3 ყვითელი ფერით (CSB) სიგნალი, ლურჯი ფერით (SBO) სიგნალი;
- ნახ. 2.5.2.4 გადამფარავი და კურსის სიგნალების გამოსხივება;
- ნახ. 2.5.2.5 ორსიხშირიანი საკურსო რადიოშუქურა;
- ნახ. 2.7.6 ორსიხშირიანი საკურსო რადიოშუქურა;
- ნახ. 2.7.1 ILS-LOC-ის რადიომიმღები, რომელიც განთავსებულია საჰაერო ხომალდზე;
- ნახ. 2.7.2 წარმოდგენილია სანავიგაციო რადიომიმღების გამარტივებული ბლოკ-სქემა, რომელიც აღწერს სანავიგაციო რადიოსიგნალის დამუშავების პროცესს;
- ნახ. 2.7.3 საჰაერო ხომალდის გადახრა (გრაფუსებში) ა.დ.ზ-ის ცენტრალური ხაზიდან;
- ნახ. 2.8.2.1 საკურსო რადიოშუქურის მინიმალური ველის დამაბულობის შემცირება;
- ნახ. 2.8.3.1 სიგნალების თავსებადობის მოდელში გამოყენებული ცვლადების აღწერა, სადაც მოცემულია სასურველი და არასასურველი სიგნალების მიღება რადიოსანავიგაციო მიმღების მიერ;

- ნახ. 2.8.3.2 რადიოკავშირის სისტემის კომპონენტები, რომლებიც აჩვენებს მინიმალური სიგნალის გავრცელების მოდელს გადამცემიდან მიმღებამდე;
- ნახ. 2.8.4.1 სანავიგაციო რადიომიმღების ანტენამდე სასურველი სიგნალის მიღების სქემატური დიაგრამა;
- ნახ. 2.8.4.2 სანავიგაციო რადიომიმღებზე არასასურველი სიგნალის მიღების სქემატური დიაგრამა;
- ნახ. 2.9.1 ჰარმონიკული სიგნალების რიგითობა;
- ნახ. 2.9.2 ინტერმოდულაციური სიგნალები;
- ნახ. 2.9.1.1 ფილტრაცია რთულია რადგან იგი ძალიან ახლოს იმყოფება სასურველ სიგნალთან;
- ნახ. 3.1.1 ფუნდამენტური სიგნალის ყოველი 1 დბ-ით გაზრდისას, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალი იზრდება 3 დბ-ით;
- ნახ. 3.1.2 ინტერმოდულაციის გამო ხელშეშლის წარმოქმნა;
- ნახ. 3.1.4 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალის და სასურველი სიგნალის გადაკვეთის წერტილის (TOI) გამოთვლა;
- ნახ. 3.2.3.1 მფრინავისთვის მიწოდებული სანავიგაციო ინფორმაცია კურსიდან გადახრის მაჩვენებლით;
- ნახ. 3.3.1 მოცემულია ინტერმოდულაციური სიგნალების ტესტირების ბლოკ-სქემა ხელშეშლის შედეგად;
- ნახ. 3.3.2 სიგნალ-გენერატორის პარამეტრების დაყენება და სპექტრული ანალიზატორის გამოყენებით მიღებული შედეგი;
- ნახ. 3.3.3 წარმოდგენილია საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სიგნალის დემოდულაციის ანალიზის შედეგები, სადაც აშკარად იკვეთება გადახრა მარცხნივ ($DDM = -0.20141$);
- ნახ. 3.3.4 ნაჩვენებია ILS-LOC სიგნალის აუდიოსიხშირის სპექტრი, სადაც აშკარად იკვეთება 150 ჰც-იანი კომპონენტის დომინირება;
- ნახ. 3.3.5 ექსპერიმენტის მიმდინარეობისას სპექტრული ანალიზატორის მიერ დაფიქსირებული ინტერმოდულაცია;

ნახ. 3.3.1.1 FM-სიგნალის სპექტრული განაწილების გრაფიკები ± 32 კჰც კვაზიპიკური გადახრით, A-გადამტანის ამპლიტუდის საბაზისო დონე, B-საშუალო ამპლიტუდა (RMS), C-პიკური ამპლიტუდა.

ცხრილების ნუსხა:

ცხრილი 2.8.3.1 კორექტირების მნიშვნელობები სიხშირული განცალკევების მიხედვით;

ცხრილი 3.3.1.1 ექსპერიმენტში გამოყენებული ILS-LOC-ის და FM სამაუწყებლო სიგნალების სიხშირეები;

ცხრილი 3.3.1.2 პირველი ექსპერიმენტით განსაზღვრული ე.მ. ხელშემლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები;

ცხრილი 3.3.2.1 ექსპერიმენტის შედეგები ზოლოვანი ფილტრით (დეციბელებში);

ცხრილი 3.3.2.2 ექსპერიმენტის შედეგები ფილტრის გარეშე (A ტიპის რადიომიმღები).

აბრევიატურების ნუსხა:

აბრევიატურა	განმარტება ინგლისურად	განმარტება ქართულად
CSB	Carrier-plus Side Band	გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით
DDM	Difference in Depth of Modulation	მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა
DSB-SC	Double Side Band Suppressed Carrier	სიგნალი ორი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით
EMI	Electro Magnetic Interference	ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა
EUR	Eurocontrol	ევროპის საჰაერო ნავიგაციის უსაფრთხოების ორგანიზაცია
EHSI	Electronic Horizontal Situation Indicator	ჰორიზონტალური ვითარების ელექტრონული ინდიკატორი
FMC	Flight Management Computer	ფრენის მართვის კომპიუტერი
FM	Frequency Modulated	სიხშირულად მოდულირებული
GBAS	Ground Based Augmentation System	თანამგზავრულ ნავიგაციაზე დაფუძნებული დაფრენის სისტემა
G/S	Glide Slope	გლისადის რადიომუქურა
ICAO	International Civil Aviation Organization	სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია

IM	Inner Marker	შიდა მომნიშვნელი რადიოშუქურა
IMD	Intermodulation	ინტერმოდულაცია
ILS	Instrument Landing System	ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემა (ILS)
ITU	International Telecommunication Union	ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირი
LPD	Log Periodic Dipole	ლოგარითმული პერიოდული ანტენა
LOC	Localizer	საკურსო რადიოშუქურა
MM	Middle Marker	შუა მომნიშვნელი რადიოშუქურა
NM	Nautical mile	საზღვაო მილი
OM	Outer Marker	გარე მომნიშვნელი რადიოშუქურა
SDR	Software-Defined Radio	პროგრამულად განსაზღვრული რადიო
SBO	Sideband Only	სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით
VHF	Very High Frequency	ზემაღალი სიხშირე
ა.დ.ზ		ასაფრენ-დასაფრენი ზოლი
სხ		საჰაერო ხომალდი
ე.მ		ელექტრომაგნიტური

შესავალი

თემის აქტუალურობა:

საჰაერო ხომალდების მოძრაობის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად, იზრდება საჰაერო ხომალდების ფრენების უსაფრთხოების უზრუნველყოფასთან დაკავშირებული გამოწვევები, რაც პირდაპირ კავშირშია სანავიგაციო სისტემების საიმედოობასთან. სწორედ ამიტომ, ერთი მხრივ, სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია (ICAO) აძლიერებს მოთხოვნებს როგორც საჰაერო ხომალდების საბორტო, ასევე სახმელეთო რადიოსანავიგაციო მოწყობილობების მიმართ. ხოლო, მეორე მხრივ, ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირი (ITU) სათანადოდ ითვალისწინებს სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) მიერ წარმოდგენილ გლობალურად კოორდინირებულ სამოქალაქო ავიაციის მოთხოვნებს და პოზიციებს შესაბამისად, თავისი რეკომენდაციებით მოქმედებს მთელ მსოფლიოში საჰაერო ტრანსპორტის რადიოსისტემების უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად.

ბოლო წლებში FM რადიომუწყებლობის სადგურების რაოდენობის ზრდამ გაზარდა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების (EMI) წარმოქმნის ალბათობა. აეროპორტების სიახლოვეს გარემოს მზარდი ელექტრომაგნიტური დაბინძურება მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს, სადაც მრავალი რადიოსისტემა ფუნქციონირებს და ელექტრომაგნიტური გარემო ხშირად გადატვირთულია სახმელეთო რადიოსისტემებით, რომლებიც სხვადასხვა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის წყაროსაც წარმოადგენს.

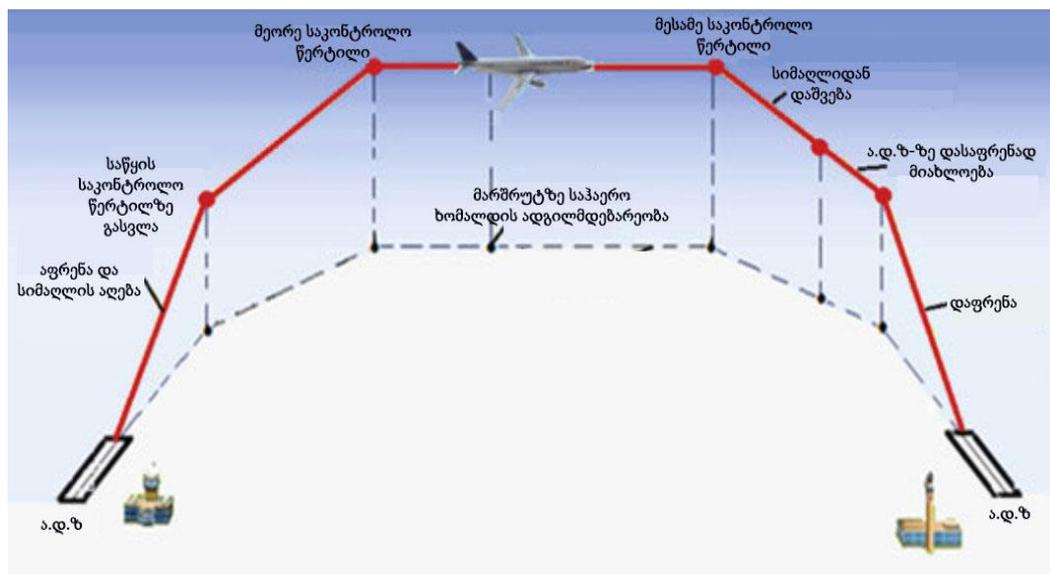
აღსანიშნავია, რომ ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირი (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია (ICAO) ერთობლივად აღიარებენ FM რადიომუწყებლობის სადგურების მიერ წარმოქმნილ ელექტრომაგნიტურ ხელშეშლებს (EMI), როგორც ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს საფრთხეს ხელსაწყოების

მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიომუქურისთვის (ILS-LOC). პრობლემა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საჰაერო ხომალდის მიახლოებისა და დაშვების კრიტიკულ ფაზებში, სადაც სახმელეთო სანავიგაციო რადიოსიგნალების მიღების სიზუსტე და მდგრადობა გადამწყვეტ მნიშვნელობას იძენს [6, 9].

საჰაერო ხომალდის მოძრაობის უზრუნველყოფის პროცესი იყოფა ორ ძირითად ამოცანად:

1. რადიოსანავიგაციო, რომელიც გულისხმობს საჰაერო ხომალდის გადაადგილებას წინასწარ განსაზღვრულ სივრცით და დროით ტრაექტორიაზე;
2. პილოტირება, ანუ საჰაერო ხომალდის მდებარეობის მართვა სამგანზომილებიან სივრცეში.[75, 76]

ნახ. 1-ზე წარმოდგენილია საჰაერო ხომალდის საჰაერო რადიონავიგაციის სრული პროცესი, რომელიც მოიცავს: აფრენას, საწყის საკონტროლო წერტილზე გასვლას, მარშრუტზე საჰაერო ხომალდის ადგილმდებარეობა, მესამე საკონტროლო წერტილი, სიმაღლიდან დაშვება, ა.დ.ზ-ზე დასაფრენად მიახლოება და დაფრენას.



ნახ. 1 საჰაერო ხომალდის ფრენის ფაზები [69]

ფრენების რაოდენობისა და სიხშირის ზრდა საჰაერო მოძრაობის მართვის პროცესში, ყველაზე დიდ პრობლემას საჰაერო ხომალდების დაშვებისა და დაფრენის ფაზაში ქმნის. კორპორაცია „ბოინგის“ 2023 წლის სტატისტიკური ანგარიშის თანახმად, საავიაციო შემთხვევების 43 % სწორედ ამ ფაზაში ხდება [49,75,74]. ამ პროცესის სამართავად და უსაფრთხო დაფრენის განსახორციელებლად აეროპორტის

ზონაში განთავსებულია რადიოსანავიგაციო სისტემები. ერთ-ერთი მათგანია ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემა (ILS – Instrument Landing System).

საჰაერო ხომალდის პირველი დაფრენა ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) გამოყენებით 1938 წელს განხორციელდა. შემდგომში კი სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციამ (ICAO) ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) საერთაშორისო სტანდარტად მიღება უზრუნველყო. სწორედ ეს სისტემა რჩება დღეს ყველაზე გავრცელებულ სისტემად სამოქალაქო ავიაციაში მსოფლიო მასშტაბით და მისი ფუნქციონირება უახლოეს მომავალშიც გაგრძელდება [50].

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის ბაზრის შემოსავალი 2019 წელს 1,215 მილიონი აშშ დოლარი იყო. 2020–2025 წლებში 5.41%-იანი (CAGR- Compound Annual Growth Rate) წლიური ზრდის ტემპით, COVID-19 პანდემიის უარყოფითი ეფექტების მიუხედავად, 2025 წელს კი 1,667 მილიონ აშშ დოლარს მიაღწია [70].

პარალელურად, სამოქალაქო ავიაციაში ინერგება უფრო ახალ ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადიოსანავიგაციო სისტემები, როგორებიცაა: SBAS, GBAS და MLS, მაგრამ ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემას (ILS) არ დაუკარგავს მნიშვნელობა მისი საიმედოობისა და პრაქტიკულ გამოყენებაში სიმარტივის გამო.

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემა (ILS) ტექნიკურად რთული სახმელეთო რადიოსანავიგაციო სისტემაა, რომელიც უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდებს ზუსტი სანავიგაციო მონაცემებით, რომლითაც მფრინავი ხელმძღვანელობს და ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით ოპტიმალური ტრაექტორიით ხომალდის უსაფრთხოდ დაფრენაში ეხმარება მას.

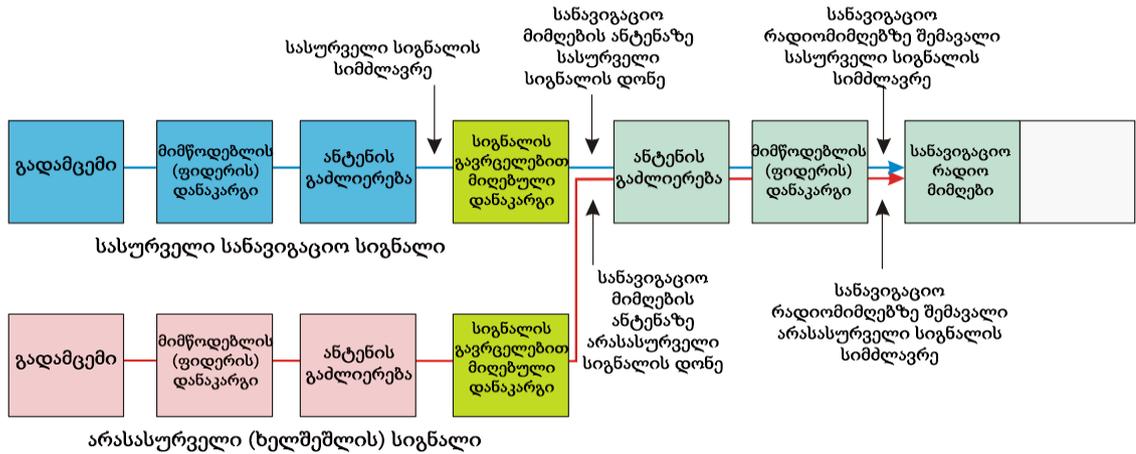
ILS სისტემის ფუნქციონირება საჰაერო ხომალდის დაფრენისას ეფუძნება 90 და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების გამოყენებას, რომლებიც საჰაერო ხომალდის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებით მიღებისთანავე საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო პარამეტრებით აისახება შესაბამის ელექტრონულ ხელსაწყოზე, რომლითაც ხელმძღვანელობს მფრინავი. შესაბამისად, ის განახორციელებს საჰაერო ხომალდის კოორდინაციას და უსაფრთხო დაშვებას

დასაფრენ ზოლზე. ამრიგად, ILS საავიაციო უსაფრთხოების უმნიშვნელოვანესი ელემენტია და გამოიყენება საერთაშორისო სტანდარტიზაციის შესაბამისად.

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემა (ILS) შედგება სამი მთავარი კომპონენტისგან, რომლებიც უზრუნველყოფს მფრინავისთვის ზუსტ სანავიგაციო მითითებებს ა.დ.ზ-თან მიმართებით საჰაერო ხომალდის მდებარეობის შესახებ:

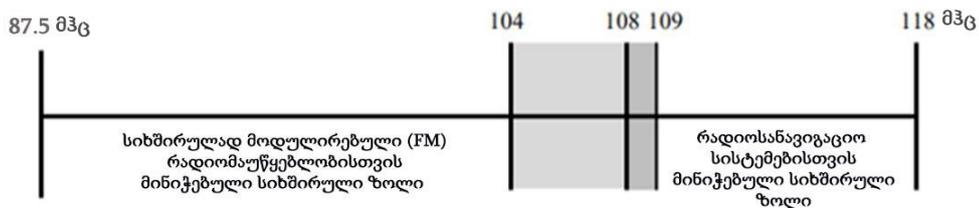
1. გლისადის რადიოშუქურა (G/S - Glide Path): უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდის ვერტიკალურ კოორდინაციას;
2. საკურსო რადიოშუქურა (LOC - Localizer): უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდის ჰორიზონტალურ კოორდინაციას;
3. მომნიშვნელი რადიოშუქურები (MB - Marker Beacons): გამოიყენება ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ზღურბლამდე დარჩენილი მანძილის მითითებისთვის.

მიუხედავად ზემოთ აღნიშნული დადებითი მხარეებისა, ILS -ს გააჩნია სუსტი მხარეც. ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს, რომ ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სანავიგაციო რადიომიმღები აეროპორტის ზონაში ექვემდებარება ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ძლიერ ზემოქმედებას, რომლის კვლევასაც ეძღვნება აღნიშნული სადისერტაციო ნაშრომი. ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის რადიოკომუნიკაციების სექტორმა (ITU-R), სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციასთან (ICAO) ერთად [6, 9], აღნიშნა FM მაუწყებლობის სადგურების მიერ საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედების შედეგად წარმოქმნილი საფრთხეების შესახებ. სწორედ ამ საკითხთან დაკავშირებული მათი დეკლარაციებიდან გამომდინარეობს აღნიშნული სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალობა.[75, 76]



ნახ. 2 სანავიგაციო რადიომიმღებზე მოქმედი სასურველი სანავიგაციო და არასასურველი ხელშემშლის სიგნალები [71]

სადისერტაციო ნაშრომში კვლევის ძირითადი ნაწილი დათმობილი აქვს ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის (შემდეგში ე.მ. ხელშემშლის) ზემოქმედებებს საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე, რომელიც ფუნქციონირებს VHF დიაპაზონის, 108.1-111.975 მჰც სიხშირულ ზოლში. აღნიშნული სიხშირული ზოლი განსაკუთრებით დაუცველია ახლომდებარე FM სამაუწყებლო სისტემებიდან (87.5 – 108 მჰც) მომდინარე ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის მიმართ, ვინაიდან მათთვის გამოყოფილი სიხშირული ზოლი მომიჯნავეა სანავიგაციო სიხშირულ ზოლის მიმართ და არ არსებობს დაცვითი ზოლი FM მაუწყებლობისთვის განკუთვნილ უმაღლეს სიხშირესა (107.9 მჰც) და საკურსო რადიოშუქურისთვის (ILS-LOC) განკუთვნილ უმაღლეს სიხშირეს (108.0 მჰც) შორის. რადიოსიხშირეების ასეთი განაწილება მიღებული და აღიარებულია საერთაშორისო დონეზე ITU-ს რადიორეგულირების რეგლამენტით [6, 9, 75, 76].



ნახ. 3 FM მაუწყებლობისთვის განსაზღვრულ სიხშირულ ზოლსა და ILS-LOC-ისთვის განსაზღვრულ სიხშირულ ზოლს შორის დაცვითი ზოლის არარსებობა [6]

კვლევისას დადგინდა, რომ საჰაერო ხომალდის რადიომიმღებებზე მოქმედი ე.მ. ხელშეშლები ძირითადად გამოწვეულია შემდეგი ფაქტორებით: FM სამაუწყებლო სადგურები ფუნქციონირებს მაღალი სიმძლავრით, რომელიც რამდენიმე ათეულ (50-100) კვტ-ს (77-80 დბ/მვ) აღწევს მაშინ, როცა მომიჯნავე ზოლში მოქმედი საავიაციო რადიოსანავიგაციო საშუალებები მუშაობს მნიშვნელოვნად დაბალ სიმძლავრეებზე 100 ვტ (50 დბ/მვ) [9].

FM სადგურების არხებიდან წარმოიქმნება მნიშვნელოვანი არასასურველი გამოსხივებები, რაც დიდ გავლენას ახდენს და საფრთხეს უქმნის საავიაციო (ILS-LOC) რადიომიმღებების ნორმალურ და უსაფრთხო ფუნქციონირებას.

ევროპაში 2001 წლის 1 იანვრიდან ევროკონტროლის დეკლარაციით [45] ცნობილი გახდა, რომ VHF FM (30-300 მჰც) მაუწყებლობის სადგურებს უფლება მიეცათ, ემუშავათ გაზრდილი სიმძლავრეებით. ამ ცვლილებამ მნიშვნელოვანი გავლენა იქონია საჰაერო ხომალდების საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) მიმღებებზე, რადგან FM მაუწყებლობის სიგნალებისთვის სიმძლავრის მომატებამ გაზარდა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის (EMI) ალბათობა, ეს მოვლენები აფერხებს ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღების საიმედო მუშაობას და იწვევს სანავიგაციო სიგნალის დამახინჯებას [45, 51].

ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI — Electromagnetic Interference) არის ეფექტი, რომელიც გამოწვეულია უსარგებლო ძლიერი ელექტრომაგნიტური ენერჯიის არსებობით. კვლევაში ე.მ. ხელშეშლა გულისხმობს ILS-LOC რადიომიმღებზე მოქმედ არასასურველ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას, რომელიც ამცირებს რადიოსანავიგაციო მიმღების მდგრადობას და ამცირებს სასარგებლო სიგნალების მიღების უნარს [10, 76, 75].

ე.მ. ხელშეშლები კლასიფიკაციის მიხედვით შესაძლოა იყოს აქტიური და პასიური. კვლევისას განხილულ იქნა აქტიური ხელშეშლები, რომლებიც გამოწვეულია ხელოვნური წარმოშობის რადიოსიხშირული გამოსხივებით (მაგალითად, სხვადასხვა ტექნიკური სისტემების ან რადიომოწყობილობების მიერ).

ე.მ. ხელშეშლა პრაქტიკაში ვლინდება სხვადასხვა სპეციფიკური ფორმით, რომელთაგან მნიშვნელოვანია:

- თანაარხული ე.მ. ხელშეშლა;
- მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა;
- სიხშირული ზოლის გარედან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა;
- ინტერმოდულაციური დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა.

ამ საკითხების კვლევის საფუძველზე ნაშრომში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ინტერმოდულაციურ ხელშეშლებს. როგორც დადგინდა, ამ ტიპის ე.მ. ხელშეშლებს შეუძლია საჰაერო ხომალდის კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე (CDI) ზემოქმედება და სერიოზული რისკის შემცველი ცდომილებების გამოწვევა [10, 11, 12, 52].

ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების, განსაკუთრებით კი ინტერმოდულაციური ტიპის ე.მ. ხელშეშლის დეტალური შესწავლა და ანალიზი უშუალოდ არის დაკავშირებული ფრენის უსაფრთხოებასთან და წარმოადგენს კრიტიკულად მნიშვნელოვან კვლევით მიმართულებას. ამიტომაც ევროკონტროლის, ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) რეკომენდაციების თანახმად, ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების გავლენა საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე უნდა წარმოადგენდეს უწყვეტი კვლევისა და მონიტორინგის საგანს [6, 7, 9].

აღნიშნული ფაქტი მკაფიოდ აღნიშნავს მოცემული პრობლემის აქტუალობას.

ნაშრომის მიზანი:

- სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების (EMI) ზემოქმედების გამოვლენა, კერძოდ, ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობებისა და სასურველი და არასასურველი სიგნალების სიმძლავრეებს შორის დაცვითი თანაფარდობების დადგენა.
- ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ახალი შედეგობრივი კლასიფიკაციის და რეკომენდაციების შემუშავება, რაც გააუმჯობესებს ILS-LOC

სანავიგაციო მიმღების მდგრადობას ე.მ. ხელშემშლელის მიმართ და უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდების უსაფრთხოდ დაფრენას.

აღნიშნული კვლევა ეფუძნება ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირისა (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) მიერ შემუშავებულ რეკომენდაციებს და მიმართულია FM მაუწყებლებიდან და სხვა წყაროებიდან წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური ხელშემშლელის ზეგავლენების შესწავლაზე. კვლევის პროცესში მაღალი სიზუსტის როდე და შვარცის (Rohde & Schwarz) ფირმის რადიომონიტორინგის ტექნიკისა და ტექნოლოგიების გამოყენებით განხორციელდება ტიპური ექსპერიმენტული ხელშემშლელის ზემოქმედებების გაზომვები. მიღებული შედეგების საფუძველზე შემუშავდება პრაქტიკული რეკომენდაციები, რომლებიც ხელს შეუწყობს ILS-LOC საბორტო რადიომიმღების მდგრადობის გაზრდას, სისტემის საიმედოობასა და უსაფრთხოების ამაღლებას.

ნაშრომში აღნიშნული მიზნის მისაღწევად დასმული ამოცანები:

1. ILS-LOC-ის ფუნქციური მოდელის აგება და ანალიზი (განხორციელდა ILS-LOC სისტემის ფუნქციური მოდელის დეტალური ანალიზი, რაც წარმოადგენდა საფუძველს სხვადასხვა კატეგორიის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლელის ზეგავლენის შემდგომი ექსპერიმენტული კვლევისთვის);
2. ანალიტიკური სცენარების დამუშავება: FM მაუწყებლობის გამო წარმოქმნილი სხვადასხვა კატეგორიის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლელის, კერძოდ, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური (IMD3) ზეგავლენის შესაფასებლად ანალიტიკური სცენარების შემუშავება;
3. ექსპერიმენტული პირობების შექმნა და გაზომვები (ლაბორატორიულ გარემოში R&S-ის მაღალი სიზუსტის აპარატურის გამოყენებით განხორციელდა ILS-LOC სისტემის რადიომიმღების გამოცდა);
4. FM სიგნალის გენერატორებისა და ILS-LOC სიგნალის გენერატორის მეშვეობით მაქსიმალურად რეალურ პირობებთან მიახლოებული სიტუაციების შექმნა (მიღებული სიგნალები შეესაბამებოდა ITU-სა და ICAO-ს რეკომენდაციებს, რამაც შესაძლებელი გახადა სხვადასხვა კატეგორიის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლელის,

კერძოდ, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური (IMD3) ზეგავლენის დეტალური ანალიზი და გაზომვა);

5. მესამე რიგის ინტერმოდულაციური მავნე ზეგავლენის შეფასება სპექტრული ანალიზის საფუძველზე, სხვადასხვა ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე სიგნალის დაცვის თანაფარდობების განსაზღვრა და ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის ზღვრული დონეების დადგენა;
6. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგებისა და თანამედროვე თეორიული კვლევების სინთეზის საფუძველზე რეკომენდაციების შემუშავება ILS-LOC რადიომიმღების ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების მიმართ მდგრადობის გაუმჯობესების მიზნით.

სადისერტაციო კვლევის მეცნიერული სიახლე:

სადისერტაციო ნაშრომის მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს:

1. ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) ზემოქმედების მათემატიკური მოდელები და მათი სცენარები. აღნიშნული მათემატიკური მიდგომის სიახლე მდგომარეობს თეორიული არაწრფივობის და საავიაციო სანავიგაციო პარამეტრების სისტემის გაერთიანებაში, რაც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის სიდიდე კონკრეტული ე.მ. ხელშეშლის პირობებში.
2. განისაზღვრა ILS-LOC რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები და სასურველი და არასასურველი სიგნალების სიმძლავრეებს შორის დაცვითი თანაფარდობები სხვადასხვა მწარმოებლის სანავიგაციო რადიომიმღებებისათვის, რომელთა გადაჭარბების შემთხვევაში მოხდება ILS-LOC სანავიგაციო მიმღების მუშაობის კრიტიკული, გამოუსწორებელი დეგრადაცია.
3. შემუშავებულია ე.მ. ხელშეშლების შედეგობრივი კლასიფიკაცია და რეკომენდაციები, რომელთა გათვალისწინება შეამცირებს სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედებას და უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდის უსაფრთხოდ დაფრენას.

სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის მეთოდოლოგია:

სადისერტაციო კვლევა ეფუძნება ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) მიერ შემუშავებულ რეკომენდაციებს, რომელთა გაანალიზებით განხორციელდა სადისერტაციო ნაშრომის კვლევისა და ექსპერიმენტის ჩატარების სწორი მიმართულება ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიომუქურაზე (ILS-LOC) მოქმედი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების კლასიფიკაციის, მავნე ხელშეშლების აღმოჩენისა და მათი განეიტრალების ზემოქმედების თვალსაზრისით. გამოყენებითი საინჟინრო კვლევისათვის ზემოაღნიშნული მეთოდოლოგიები ასახულია სანავიგაციო რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედების მათემატიკურ სცენარებში.

წარმოდგენილი კვლევის მათემატიკური მოდელირება ეყრდნობა არაწრფივი ანალიზის მეთოდებს. ნაშრომის საფუძველს წარმოადგენს მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტების წარმოქმნის მექანიზმი, რაც აღწერილია ფუნქციის ტეილორის ხარისხოვან მწკრივად გაშლის მეშვეობით. ტეილორის მწკრივის მესამე ხარისხის წევრი წარმოადგენს ამ თეორიულ საფუძველს, რომელიც ხსნის $2f_1 - f_2$ ტიპის კომბინაციური სიხშირეების ფორმირებას ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღების არაწრფივ სისტემაში. [75,76]

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება:

საკაერო ხომალდის ILS-LOC-ის რადიომიმღებების სამომავლო ახალ კონსტრუქციებში ფართოდ იქნება გამოყენებული პროგრამულად განსაზღვრული რადიო (SDR) ტექნოლოგიები, რომლებსაც ILS-LOC ჰეტეროდინულ რადიომიმღებებთან შედარებით მნიშვნელოვანი უპირატესობა ექნება ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზეგავლენის განეიტრალების კუთხით.

სადისერტაციო ნაშრომის შედეგობრივი კვლევის სიახლეები და შემუშავებული რეკომენდაციები, ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგები პრაქტიკულად გამოყენებადია, როგორც ახალი ტიპის ჰეტეროდინული კონსტრუქციის საბორტო მიმღებებისათვის, აგრეთვე SDR ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული ILS-LOC

რადიომიმღებების ალგორითმის შემუშავებისთვის. SDR ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული ILS-LOC მიმღებები წარმოადგენს სამომავლო ტექნოლოგიებს, კვლევის შედეგების გამოყენება შესაძლებელია სანავიგაციო რადიომიმღების ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების მიმართ მდგრადობის გასაუმჯობესებლად, რაც უმნიშვნელოვანესია სისტემის პროექტირებისა და დამუშავების ეტაპებზე.

შედეგების უტყუარობა:

საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის ზეგავლენის შესაფასებლად ნაშრომში წარმოდგენილია რადიონავიგაციის სისტემების თეორიული ანალიზი და ექსპერიმენტული კვლევა. თეორიული ნაწილი ეფუძნება ემპირიულ ანალიზსა და საერთაშორისო ორგანიზაციების ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირისა (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) მიერ შემუშავებულ რეკომენდაციებს. რაც შეეხება ექსპერიმენტულ კვლევას, ის ჩატარდა ჩეხეთის რესპუბლიკის ბრნოს თავდაცვის უნივერსიტეტის სანავიგაციო სისტემების ლაბორატორიაში. კვლევის პროცესში გამოყენებული იყო ლიცენზირებული სიგნალ-გენერატორი, მაღალი სიზუსტის სპექტრული ანალიზატორი და დამხმარე ხელსაწყოები. ექსპერიმენტში გამოყენებული გენერირებული სიგნალები შერჩეული და მოდულირებული იყო სათანადო სტანდარტების შესაბამისად, რაც იძლევა შედეგების უტყუარობის საფუძველს.[76, 75]

თავი 1. არსებული ბიბლიოგრაფიული მასალის მიმოხილვა და ანალიზი

სადისერტაციო კვლევა ეფუძნება სხვადასხვა სამეცნიერო ნაშრომსა და პრაქტიკულ ექსპერიმენტს, რომლებიც ჩატარდა აშშ-ში, იაპონიაში, ჩეხეთში, ბულგარეთში, ჩინეთში, შვედეთსა და პორტუგალიაში [27, 29, 38, 39, 40, 48].

კვლევის შედეგები აჩვენებს, რომ ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის (შემდგომში ე.მ. ხელშეშლა) წყარო არ არის მხოლოდ FM მაუწყებლობის სადგურებიდან გენერირებული სიგნალები.

თანამედროვე რადიოტექნოლოგიების უწყვეტი განვითარებისა და ფართო დანერგვის ფონზე, ელექტრომაგნიტური გარემო სულ უფრო რთული და გადატვირთული ხდება, რაც ხელს უწყობს ე.მ. ხელშეშლების სხვადასხვა სახეობის წარმოქმნას [10].

1.1 ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მოქმედი ე.მ. ხელშეშლის კატეგორიები

ე.მ. ხელშეშლა, წყაროს ბუნებიდან გამომდინარე, ორ ძირითად კატეგორიად იყოფა: პასიურ ე.მ. ხელშეშლად და აქტიურ ე.მ. ხელშეშლად:

პასიური ე.მ. ხელშეშლა წარმოიქმნება ბუნებრივი მოვლენების შედეგად, როდესაც ელექტრომაგნიტური ტალღები განიცდიან ცვლილებებს გავრცელებისას. მაგალითად, სხვა რადიოგადამცემიდან გამოსხივებული სიგნალები შეიძლება აირეკლოს იონოსფეროდან, განიცადოს დიფრაქცია დაბრკოლებებისგან (მაგალითად,

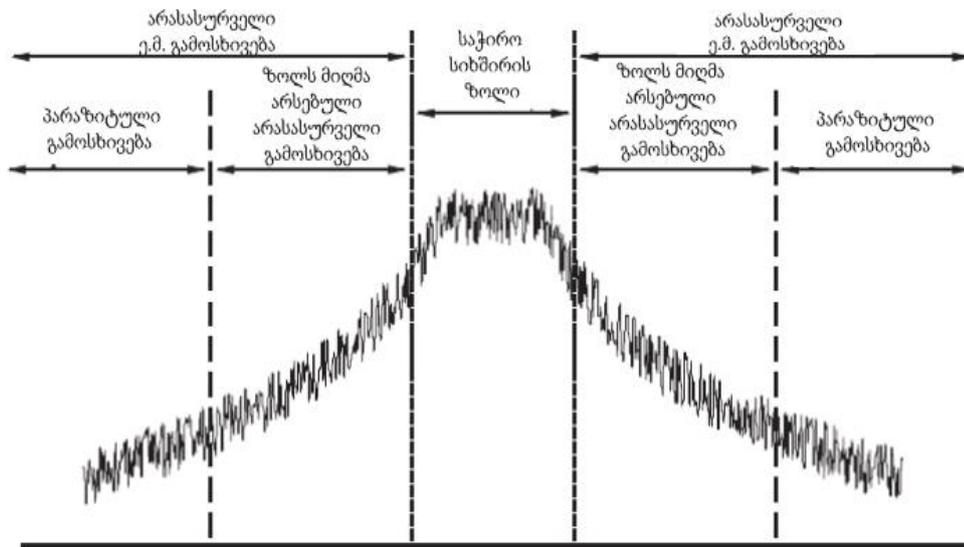
მთებიდან), აირეკლოს სხვადასხვა ობიექტიდან ან გამოავლინოს მეორეული გამოსხივება. ამ ცვლილებების შედეგად, ILS-LOC რადიომიმღები იღებს არა მხოლოდ ძირითად, სასარგებლო სიგნალს, არამედ მის დამახინჯებულ ვერსიებსაც, რაც ხელს უშლის სანავიგაციო რადიომიმღების ნორმალურ ფუნქციონირებას [10, 27].

აქტიური ე.მ. ხელშეშლა ხელოვნური წარმოშობისაა და გამოწვეულია სხვადასხვა მოწყობილობიდან ან სისტემიდან მომდინარე არასასურველი რადიოსიხშირული გამოსხივებით. აქტიური ხელშეშლის წყაროებია, მაგალითად, არასანავიგაციო მოწყობილობები და ობიექტები. მათ მიერ გამოსხივებული სიგნალები აფერხებს სასარგებლო სანავიგაციო სიგნალის მიღებას, რაც იწვევს სანავიგაციო რადიომიმღებში სასურველი სიგნალის ხარისხის გაუარესებას ან სრულ ჩახშობას[10,27].

ამრიგად, ე.მ. ხელშეშლის ზოგადი კლასიფიკაცია წყაროს ბუნების მიხედვით მოიცავს პასიურ და აქტიურ კატეგორიებს. აქტიური ე.მ. ხელშეშლის შემდგომი კლასიფიკაცია ხორციელდება სიხშირულ მდებარეობაზე დაყრდნობით, რაც შემდეგი კატეგორიის ე.მ. ხელშეშლების განსხვავების საშუალებას იძლევა:

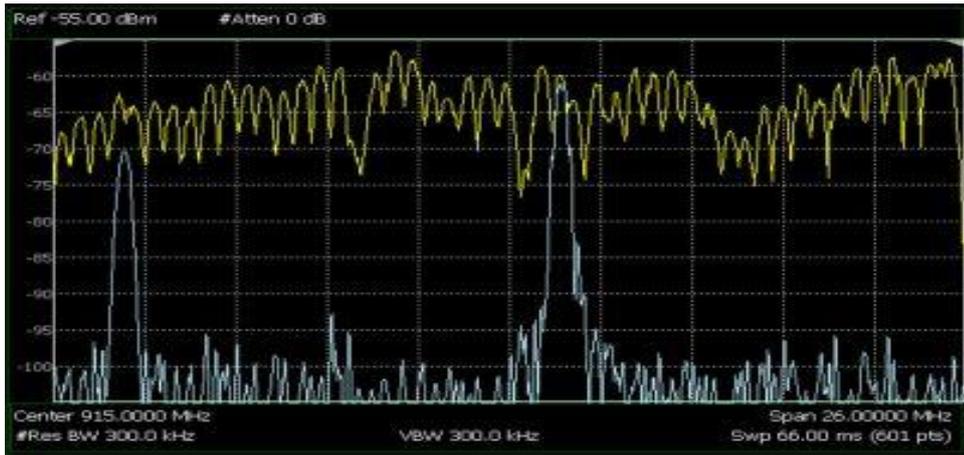
თანაარხული ე.მ. ხელშეშლა: წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც სხვადასხვა გადამცემი მუშაობს იმავე სიხშირულ დიაპაზონში, რომელსაც სასარგებლო სიგნალი იყენებს. ამ ტიპის ე.მ. ხელშეშლა ხდება მაშინ, როდესაც არასასურველი სიგნალის კომპონენტები სანავიგაციო რადიომიმღების შუალედური სიხშირის ზოლში ხვდება. რადიოსისტემებში სიხშირის ეფექტურად გამოყენებისთვის, ერთი და იმავე სიხშირულ არხს ხელახლა იყენებენ მხოლოდ განსაზღვრული სივრცითი დაშორების შემდეგ. ამ მეთოდს არხის ხელახალი გამოყენება (co-channel reuse) ეწოდება, რომლის დროსაც, ყოველთვის არსებობს თანაარხული ე.მ. ხელშეშლის წარმოქმნის რისკი, რომელიც პირდაპირ კავშირშია მანძილთან: რაც უფრო მცირეა მანძილი, მით უფრო მაღალია ე.მ. ხელშეშლის რისკი, თუმცა იზრდება სიხშირის გამოყენების ეფექტურობა. რაც უფრო დიდია მანძილი, მით უფრო მცირდება ე.მ. ხელშეშლის რისკი, მაგრამ მცირდება სიხშირის გამოყენების ეფექტურობაც. როდესაც სასარგებლო სანავიგაციო სიგნალთან ერთად იმავე არხზე ხელშეშმული სიგნალიც არსებობს, საჭაერო ხომალდის სანავიგაციო რადიომიმღები ორივე სიგნალს ერთდროულად ამუშავებს.

როდესაც თანაარხული ხელშემლის სიგნალი და სასარგებლო სიგნალი განსხვავდება მოდულაციის ინდექსით (სიღრმით) ან ფაზით, რადიომიმღების გამომავალზე ხდება ინფორმაციის დამახინჯება რაც უფრო იზრდება არასასურველი სიგნალის სიმძლავრე, მით უფრო მცირდება სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა (SNR). ILS-LOC რადიომიმღების გამომავალზე საკმარისად ძლიერმა თანაარხულმა ე.მ. ხელშემლამ კი შეიძლება გამოიწვიოს სანავიგაციო რადიომიმღების სრული ჩახშობა ან ბლოკირება [10, 27].



ნახ. 1.1 რადიოგადამცემების სასარგებლო საინფორმაციო სიგნალზე მომყოლი ჰარმონიკები და არასასურველი გამოსხივებების განაწილება [1]

მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშემლა: მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშემლა წარმოადგენს ისეთ ხელშემლას, რომელიც იქმნება რადიომიმღების რადიოსიხშირულ გამტარ ზოლში. აღნიშნული ე.მ. ხელშემლა ამცირებს რადიომიმღების სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობას და მგრძნობელობას; განსაკუთრებით ძლიერი ე.მ. ხელშემლის შემთხვევაში შესაძლებელია რადიომიმღების არხების ჩახშობა [10].

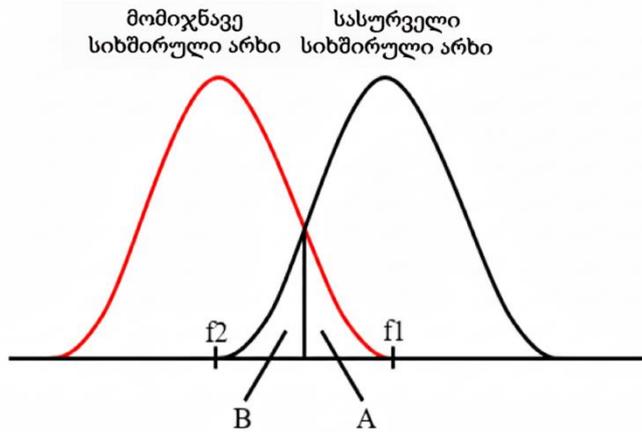


ნახ. 1.2 სპექტრულ ანალიზატორზე დაფიქსირებული ე.მ. ხელშემშლა [72]

იმისათვის რომ ე.მ. ხელშემშლის სიგნალები სპექტრული ანალიზატორის ეკრანზე ცალკე სიგნალებად გამოჩნდეს, საჭიროა ორ სიხშირულ კომპონენტს შორის მინიმალური დაშორების განსაზღვრა [72].

ნახ. 1.3-ზე ნაჩვენებია ორი სიხშირული არხის სპექტრული გადაფარვა, როგორც მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშემშლის მაგალითი. შავი მრუდი ასახავს სასურველ არხს, სადაც განთავსებულია სისტემის ძირითადი სიგნალი, რომლის ცენტრალური სიხშირეა f_1 წითელი მრუდი წარმოადგენს მომიჯნავე სიხშირულ არხს, რომელშიც მუშაობს სხვა რადიოგადამცემის სიგნალი, რომლის ცენტრალური სიხშირეა f_2

წერტილები A და B აღნიშნავენ იმ სიხშირით ზღვრულ არეალებს, სადაც ორ რადიოარხს შორის იწყება სპექტრული გადაფარვა. სწორედ ამ ზონაში ხდება მომიჯნავე არხის სიგნალის ნაწილობრივი შეღწევა სასურველი სისტემის რადიოარხში, რაც იწვევს ე.მ. ხელშემშლას მომიჯნავე არხიდან.



ნახ. 1.3 ე.მ. ხელშეშლის წარმოქმნა მომიჯნავე რადიოარხიდან

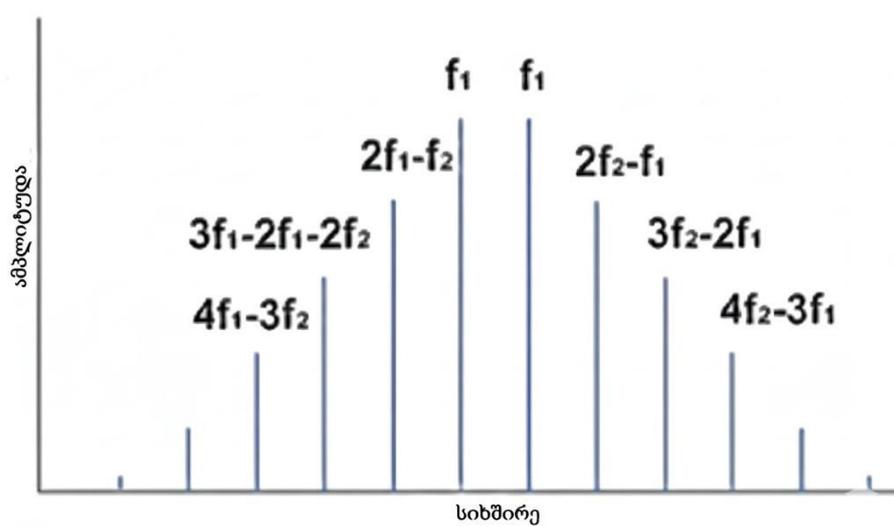
რადიოგადამცემის მხარეს, ე.მ. ხელშეშლის გამომწვევი ფაქტორებია დაბალი სიხშირული სტაბილურობა და ზედმეტად მაღალი მოდულაციის ინდექსი (სიღრმე), რაც გადაცემული სიგნალის სპექტრის გადაჭარბებულ გაფართოებას იწვევს. თუ რადიოგადამცემის ზოლის სიგანეზე მოქმედი ფაქტორები მკაცრად არ კონტროლდება, ადვილად წარმოიქმნება არასასურველი ე.მ. გამოსხივება[10].

სიხშირული ზოლის გარედან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა: გადამცემის მიერ მომიჯნავე სიხშირული ზოლის გარედ გაგზავნილი არასასურველი სიგნალი მიღებისას, რადიომიმღების მიერ ნორმალურ სამუშაო სიხშირულ ზოლში წარმოიქმნება ე.მ. ხელშეშლა, რომელიც ამცირებს სისტემის სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობას. ამ ტიპის ე.მ. ხელშეშლას ეწოდება ზოლის გარედან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა. იგი, როგორც წესი, შეიძლება დაიყოს ორ კატეგორიად: რადიოგადამცემის მიერ წარმოქმნილი არასასურველი სიხშირის შედეგად წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა და რადიომიმღების არასაკმარისი შერჩევითობის გამო არასასურველი სიგნალების მიერ წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა. VHF რადიოგადამცემები ძირითადი სიხშირის მისაღებად იყენებენ კრისტალურ ოსცილატორს, რომელიც შემდგომ, სიხშირის მულტიპლიკატორებისა და მაღალი სიხშირის გამაძლიერებლების მეშვეობით, გარდაიქმნება გადამტან სიხშირედ. ამ საფეხურების არაწრფივი მახასიათებლების გამო ჩნდება სხვადასხვა ჰარმონიკული კომპონენტი, ხოლო მათი ურთიერთქმედების შედეგად ყალიბდება შუალედური სიხშირის სიგნალები. აღნიშნული ჰარმონიკული კომპონენტები ძლიერდება და საბოლოოდ გადაიცემა რადიოეთერში, რის შედეგადაც

წარმოიქმნება არასასურველი ხელშემლის სიგნალები. ისინი, ILS-LOC რადიომიმღების ანტენაზე მოხვედრისას, იწვევს სისტემის მუშაობის დარღვევას [10].

ინტერმოდულაციური ხელშემლა: არაწრფივ მოწყობილობაში ორი ან მეტი სხვადასხვა სიხშირის სიგნალის არსებობის შემთხვევაში, არაწრფივი გარდაქმნის შედეგად წარმოიქმნება ახალი სპექტრული კომპონენტები:

- ჰარმონიკები, რომლებიც წარმოადგენს თითოეული საწყისი სიგნალის სიხშირის ჯერადებს (მაგ., $2f$, $3f$, $4f$ და ა.შ.);
- ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რომლებიც წარმოიქმნება სხვადასხვა სიგნალების სიხშირული კომბინაციებით (მაგ., $f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm f$, $2f_2 \pm f_1$ და სხვ.).



ნახ. 1.4 ორი ფუნდამენტური სიგნალის (f_1 და f_2) არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი ინტერმოდულაციური პროდუქტები [72]

ინტერმოდულაციური დამახინჯება, ანუ სპექტრის ხელახალი ზრდა, არის ორი ან მეტი განსხვავებული სიხშირის შემცველი სიგნალების ამპლიტუდების მოდულაცია, რაც გამოწვეულია რადიოელექტრონული აქტიური კომპონენტების არაწრფივობით. ის ხშირად წარმოიქმნება რადიოგადამცემის და რადიომიმღების სიმძლავრის გამაძლიერებელში არაწრფივი ეფექტების გამო [72]. პასიურ კომპონენტებშიც, მათ შორის, ანტენებში, კაბელებსა და კონექტორებში ასევე შეიძლება წარმოიქმნას ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშემლები. ისინი ხშირად მოიხსენიება, როგორც პასიური ინტერმოდულაცია (PIM), ეს შეიძლება მოხდეს

პასიურ კომპონენტებში, რომლებიც აღზნებულია ორი ან მეტი მაღალი სიმძლავრის სიგნალით. არაწრფივი მახასიათებლების მქონე ელექტრულ წრედს შეუძლია დაამახინჯოს ფუნდამენტური სიხშირის კომპონენტები და წარმოქმნას მაღალი რიგის ჰარმონიკული სიხშირის კომპონენტების დაშლის სერია. ეს გენერირებული ჰარმონიკები შეიძლება პრობლემური იყოს, თუ ისინი მოხვდება ILS-LOC სისტემის მიღების დიაპაზონში. თუ ისინი საკმარისად დიდია, მათ შეუძლიათ ეფექტურად დაბლოკონ რადიომიმღების არხი. მსგავსი ე.მ. ხელშეშლა ამცირებს სისტემის სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობას და იწვევს რადიომიმღების მუშაობის სერიოზულ დარღვევას.

ინტერმოდულაციური ხელშეშლის იდენტიფიცირება და ანალიზი საკმაოდ რთულია, ხოლო მის მიერ გამოწვეული ზეგავლენა არსებითია და სანავიგაციო რადიომიმღებისთვის სერიოზულ საფრთხეს წარმოადგენს.

1.2 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე მოქმედი ე.მ. ხელშეშლების ფორმები

არალიცენზირებული რადიოგადაცემებიდან გენერირებული ე.მ. ხელშეშლები

პრაქტიკაში ზოგიერთი მომხმარებელი თვითნებურად ზრდის მოწყობილობების დასაშვებ ნომინალურ სიმძლავრეს, რათა გააუმჯობესოს სიგნალის გადაცემის ხარისხი რაც, საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო რადიომიმღებში ზრდის ამ მოწყობილობების მიერ აეროპორტების ან სხვა საჰაერო ნავიგაციის ობიექტების სიახლოვეს ე.მ ხელშეშლის წარმოქმნის რისკს [10].

აღსანიშნავია, რომ არალიცენზირებული ან მაღალ სიმძლავრეზე მომუშავე რადიოსადგურების გარდა, ბაზარზე და ექსპლუატაციაში არსებობს სპეციალური მოწყობილობები და ტექნოლოგიები, რომელთაგანაც შეიძლება წარმოიშვას ხელოვნურად გენერირებული ე.მ. ხელშეშლა. ამ ტიპის მოწყობილობებს შეიძლება მიეკუთვნონ პირადი დამცავი მოწყობილობები (PPD — *Personal Protected Device*), ექსპერიმენტული სიგნალ-გენერატორები, მოდულატორები და ელექტრომაგნიტური იმიტატორები, რომლებიც მიზანმიმართულად ან შემთხვევით წარმოქმნიან ე.მ. ხელშეშლას სანავიგაციო რადიომიმღებზე.

ელექტრომაგნიტური შეტევა ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე შესაძლებელია იყოს როგორც მიზანმიმართული, ასევე შემთხვევითი. უკაბელო რადიოკავშირის საშუალებების ფართომასშტაბიანმა გავრცელებამ მსოფლიოში მნიშვნელოვნად გაზარდა ე.მ. ხელშემშლის ალბათობა [7,18, 75].

საჰაერო ხომალდების ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) უსაფრთხოების საკითხებზე ჩატარებულ კვლევებს შორის, განსაკუთრებით აღსანიშნავია 2019 წლის ბოსტონის უნივერსიტეტის ნაშრომი, რომელიც 2019 წელს გამოქვეყნდა [48]. აღნიშნულ კვლევაში სიღრმისეულად არის გამოკვლეული საკურსო რადიოშუქურის რადიომიმღებზე განზრახ დაგენერირებული ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედება. [76]

ამ ექსპერიმენტის შედეგები ადასტურებს რომ განზრახ გენერირებული ე.მ. ხელშემშლით შესაძლებელია რეალურ დროში მოხდეს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის არასწორი ფუნქციონირება. მსგავსმა ე.მ. ხელშემშლამ, განსაკუთრებით ცუდი ხილვადობის პირობებში, შესაძლოა გამოიწვიოს ავარიული დაშვება ან თვითმფრინავის ასაფრენ-დასაფრენი ზოლიდან აცდენა [48].

ექსპერიმენტული გაზომვები და სისტემის ფუნქციონალური მოდელირება ჩატარდა ლაბორატორიულ გარემოში. ე.მ. ხელშემშლის წარმოსაქმნელად გამოყენებულ იქნა სიგნალ-გენერატორი, რომელიც გზავნიდა შესაბამის, მოდულირებულ სიგნალებს საჰაერო ხომალდის ILS-LOC რადიომიმღებისკენ.

განზრახ გენერირებულმა ე.მ. ხელშემშლამ გამოიწვია კურსის გადახრის მაჩვენებლის (CDI) ცდომილება 0.5° -ით, რის შედეგადაც საჰაერო ხომალდი ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალურ ხაზს დაახლოებით 18 მეტრით აცდა. ექსპერიმენტით დადასტურდა, რომ დაბალი სიმძლავრის ელექტრომაგნიტურ შეტევებსაც კი შეუძლია საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში ცდომილების გამოწვევა [48].

აეროპორტის რადიოსისტემებიდან და საჰაერო ხომალდის ელექტრონული

კომპონენტებიდან გამოწვეული ე.მ. ხელშემშლა

აეროპორტის ზონა წარმოადგენს რთულ ელექტრომაგნიტურ გარემოს, რის გამოც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სრულად აღმოფხვრა პრაქტიკულად

შეუძლებელია [10]. აეროპორტში საჰაერო ხომალდის მოძრაობის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად, დამონტაჟებულია მრავალი სახის რადიოელექტრონული მოწყობილობა, რომლებიც მუშაობის პროცესში წარმოქმნიან ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას. ასეთ შემთხვევაში, სამოქალაქო ავიაციისთვის გამოყოფილი რადიოსისტემები შესაძლოა თავად იქცნენ ე.მ. ხელშემშლის წყაროდ ILS-LOC-ის რადიომიმღებისთვის.

გარდა აეროპორტის რადიომოწყობილობებისა, ე.მ. ხელშემშლის წყარო შესაძლებელია იყოს საჰაერო ხომალდის ელექტრონული კომპონენტები [10, 40].

საჰაერო ხომალდების საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშემშლის ზეგავლენის შეფასების კუთხით, მნიშვნელოვანია ჩეხეთის რესპუბლიკის, ბრნოს თავდაცვის უნივერსიტეტის მკვლევართა მიერ შესრულებული ნაშრომი [40].

ლაბორატორიული პირობებში გამოკვლეულ იქნა საბორტო ელექტრონული მოწყობილობებისა და მაღალი სიმძლავრის ელექტრონული კომპონენტების გადართვითი პროცესებით წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის (EMI) ზეგავლენა საკურსო რადიოშუქურის ILS-LOC რადიომიმღებებზე. თანამედროვე საბორტო ელექტრონიკა, მოიცავს გარდამქმნელებს, გამმართველებს, გადამრთველებსა და სხვადასხვა იმპულსურ სქემებს, რომლებიც წარმოქმნიან ფართო სპექტრის სიგნალებს. საჰაერო ხომალდის შიგნით სისტემების სივრცითი სიახლოვის გამო, ეს სიგნალები შეიძლება გახდეს ე.მ. ხელშემშლის მიზეზი VHF დიაპაზონში [40].

საჰაერო ხომალდის ელექტრო ქსელში სხვადასხვა ელექტრონული კომპონენტების მაღალსიჩქარიანი გადართვა წარმოქმნის ე.მ. ხელშემშლას რომელიც უარყოფითად ზემოქმედებს რადიოსანავიგაციო სისტემებზე. ეს გამოწვეულია იმით, რომ საბორტო ელექტროსქემების მიერ წარმოქმნილი დარღვევები უფრო ძლიერია, ვიდრე ანტენის მიერ მიღებული სუსტი სანავიგაციო სიგნალები [4, 75]. საჰაერო ხომალდის ელექტროქსელში სხვადასხვა ელექტრონული კომპონენტების მაღალსიჩქარიანი გადართვის პროცესი იწვევს დენის სიმძლავრის ხანმოკლე მატებასა და შემცირებას, რაც წარმოშობს არასასურველ ჰარმონიკებს. ამგვარი ხელშემშლის

სიმძლავრე არ არის კონცენტრირებული მხოლოდ ერთ ნაწილზე, არამედ ვრცელდება სიხშირეთა გარკვეულ დიაპაზონში (კვც-დან რამდენიმე მჰც-მდე).[76]

ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ საბორტო ელ. წრედების განივ-იმპულსურ მოდულაციაზე (PWM) დაფუძნებული მაღალსიხშირისიანი გადართვები წარმოქმნის ფართოხოლოვან ხელშეშლის სიგნალებს, რომელთა ჰარმონიკები და ინტერმოდულაციური სიგნალები აღწევენ ILS-LOC რადიომიმღების შუალედურ სიხშირეებზე, ამცირებენ მის მგრძობელობას და იწვევენ შეცდომებს სანავიგაციო ინფორმაციის დამუშავებისას, მათ შორის, კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) მცდარ ჩვენებას ან მტყუნების მანიშნებლის გააქტიურებას [40, 59].

თანამედროვე ელექტრონული კომპონენტების დანერგვა პოტენციურ საფრთხეს უქმნის სისტემების უსაფრთხოებასა და საიმედოობას, რადგან იწვევს პრობლემებს როგორც ბორტზე განთავსებული საკომუნიკაციო სისტემებისთვის, ასევე საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებების მუშაობისთვის [40, 58].

ბუნებრივი და გეოფიზიკური ფაქტორებით გამოწვეული ე.მ. ხელშეშლა

საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის ზეგავლენის შესაფასებლად, განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს იაპონელი მკვლევრების მიერ ჩატარებული კვლევა, რომლის ანალიზიც 2023 წელს გამოქვეყნდა ჟურნალ *Space Weather*-ში. ავტორებმა კვლევის საფუძველზე დაადგინეს, რომ იონოსფეროს სპორადული-E (Es) ფენა ქმნის ზემალა სიხშირულ დიაპაზონში (VHF) მომუშავე საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სიგნალების ანომალური გავრცელების პირობებს, რის შედეგადაც, შორეული სიგნალები აღწევს დიდი მანძილით დაშორებულ სხვა საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებამდე და იწვევს თანასიხშირულ ე.მ. ხელშეშლას.

ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების შესწავლის მიზნით, მკვლევრებმა შეიმუშავეს მეთოდოლოგია, რომელიც ეფუძნება სერტიფიცირებული ILS-LOC რადიომიმღების და პროგრამულად განსაზღვრული რადიოს (SDR) ერთობლივ გამოყენებას. იონოსფეროზე დაკვირვება ხდებოდა იაპონიაში, ოთხ სხვადასხვა გეოგრაფიულ მდებარეობაზე დამონტაჟებული

იონოზონდებით. ეს მეთოდი შესაძლებელს ხდის VHF დიაპაზონში სპექტრული ცვლილებების დეტალურ ანალიზს და იონოსფერული ანომალიების უკეთ შესწავლას. იონოსფეროს სპორადული-E (Es) ფენა იწვევს ზემოდალი სიხშირის (VHF) რადიოტალღების (100 მჰც) ანომალიურ გავრცელებას შორეულ მანძილებზე, რაც წარმოქმნის ე.მ. ხელშეშლას (EMI) ILS-LOC რადიომიმღებში [38, 39].

კრიტიკული სიხშირე არის რადიოსიხშირის ზედა ზღვარი, რომლითაც იონოსფეროს შეუძლია ვერტიკალურად მოხვედრილი რადიოტალღების არეკვლა. ჩვეულებრივ იონოსფერულ პირობებში, კრიტიკული სიხშირე რამდენიმე მჰც-ია. თუმცა, Es ფენის დროს ეს მნიშვნელობა შეიძლება 15 მჰც-საც კი აღემატებოდეს [4]. დაბალი კრიტიკული სიხშირის პირობებში, VHF კომუნიკაცია შესაძლებელია მხოლოდ პირდაპირი მხედველობის ხაზის (LOS) ფარგლებში (150 კმ-მდე). [75,76] თუმცა, როდესაც Es ფენის ელექტრონული სიმკვრივე მაღალია, VHF ტალღები შეიძლება გავრცელდეს გადამცემიდან 2000 კმ-ზე მეტ მანძილზე; იონოსფერული გავრცელების ზონა განლაგებულია დაახლოებით 600-დან 2500 კმ-მდე, ხოლო მათ შორის არსებობს ე.წ. „გამოტოვების ზონა“, სადაც VHF კომუნიკაცია შეუძლებელია [4, 38, 39].

ექსპერიმენტმა [39] დაამტკიცა, რომ იონოსფეროდან სიგნალის ანომალიური არეკვლის შედეგად, შორეული რადიოშუქურიდან გავრცელებული სიგნალების ინტენსივობამ კონკრეტული ILS-LOC-ისთვის განკუთვნილ სამუშაო ზონაში ადგილობრივი საკურსო რადიოშუქურის სიგნალსაც კი გადააჭარბა. ეს მოვლენა საჭაერო ხომალდის ILS-LOC რადიომიმღებში წარმოქმნის ე.მ. ხელშეშლას და იწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) მცდარ რეაგირებას, ასეთი ანომალიური გავრცელება საგანგაშოა [38, 39, 76, 75].

იაპონიაში (ქალაქი კურე) დაფიქსირდა ძლიერი არასასურველი სიგნალების ზემოქმედება ILS-LOC სიხშირეზე. 110.30 მჰც სიხშირეზე დაფიქსირებული სიგნალი ეკუთვნოდა საკურსო რადიოშუქურას, რომელიც განთავსებული იყო ტაივანში (ქალაქი ჰუალიენი). იონოსფერული ანომალიური გავრცელების მეშვეობით (EsAP), სიგნალი გავრცელდა 1,550 კმ-ის მანძილზე. მიღებული სიგნალის სიმძლავრე (-99 დბ/მვ) საკმარისი აღმოჩნდა ILS-LOC რადიომიმღებში თანასიხშირული ე.მ.

ხელშეშლის წარმოსაქმნელად, რომელმაც გამოიწვია კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) ცრუ გადახრა. ექსპერიმენტით ასევე დამტკიცდა, რომ ILS-LOC სიგნალების მიღება რადიოჰორიზონტის ფარგლებს გარეთაც შესაძლებელია [4, 38, 39].

კარლოს ა. ფერნანდესის მიერ პორტუგალიაში ჩატარებული კვლევა [56] ადასტურებს, რომ საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღების გამართულ ფუნქციონირებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც რელიეფის ფორმა, ასევე ახლომდებარე შენობა-ნაგებობები. ნაშრომში [60] დეტალურად არის განხილული, თუ როგორ წარმოქმნის სიგნალის არეკვლა ე.მ. ხელშეშლას, რაც საფრთხეს უქმნის საავიაციო სანავიგაციო სისტემების საიმედოობას.

რადიოსიხშირეები, რომლებიც სამოქალაქო ავიაციისთვის არის განკუთვნილი, ძირითადად სწორხაზოვან გავრცელებას (LOS) ეფუძნება. ეს ნიშნავს, რომ რადიოტალღები პირდაპირ ვრცელდება რადიოგადამცემიდან რადიომიმღებამდე, პირდაპირი ხილვადობის ფარგლებში (LOS). თუმცა, რელიეფის თავისებურებების გავლენით, შესაძლოა გამოუვლინდეს სხვა გავრცელების მახასიათებლებიც:

- არეკვლა - როდესაც რადიოსიგნალი დიდი და გლუვი ზედაპირიდან (მაგალითად, მთებიდან ან წყლის ზედაპირიდან) ირეკლება;
- გაფანტვა - როდესაც რადიოსიგნალი არეკვლის ნაცვლად, იფანტება უსწორმასწორო ზედაპირზე მოხვედრისას;
- დიფრაქცია - როდესაც რადიოსიგნალი ობიექტებს (მაგალითად, მთებს ან შენობებს) უვლის გვერდს და მათ მიღმა არსებულ სივრცეში აგრძელებს გავრცელებას.

საკურსო რადიომუქურის გადამცემის (ILS-LOC) ანტენის გამოსხივებული სიგნალი დამოკიდებულია რელიეფის თავისებურებებზე. ტალღების არეკვლისას ჩნდება შთაბეჭდილება, თითქოს სიგნალი მოდის წარმოსახვითი „სარკისებური ანტენიდან“, რომელიც რეალური ანტენის სიმეტრიულ პროექციას შეესაბამება. ნამდვილი და ანარეკლი სიგნალების გაერთიანება იწვევს ხელშეშლას. შესაბამისად, აეროპორტების მახლობლად რელიეფის ცვლილებები, ახალი ნაგებობების აღმართვა ან მეტალის ობიექტების განთავსება მნიშვნელოვნად ზრდის ასეთი ე.მ. ხელშეშლის რისკს [4].

ექსპერიმენტის [60] შედეგად გამოვლინდა, რომ მეტალის ობიექტებიდან ან რელიეფის ელემენტებიდან წარმოქმნილი ანარეკლი იწვევს სიგნალის ფაზის ცვლას, რაც პირდაპირ მოქმედებს ILS-LOC-ის რადიომიმღების ფუნქციონირებაზე [60].

მაღალი სიმძლავრის FM რადიოგადამცემების მიერ გამოწვეული ე.მ. ხელშეშლა

მაღალი სიმძლავრის რადიოსადგურებად მოიაზრება FM რადიომამუწყებლობის სადგურები, რომლებსაც ახასიათებთ ძალიან დიდი გამოსხივების სიმძლავრე, ზოგ შემთხვევაში ათეულობით კილოვატი. ანტენები, როგორც წესი, დამონტაჟებულია მაღალ ნაგებობებზე ან შემაღლებულ ადგილას განთავსებულ რადიოანძებზე. ხშირია შემთხვევა, როცა ერთ რადიოანძაზე რამდენიმე სხვადასხვა სერვისების ანტენა არის განთავსებული, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის ინტერმოდულაციური ხელშეშლის წარმოქმნის ალბათობას [10].

ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის ITU-ს რადიორეგულირების თანახმად, FM-სამამუწყებლო სერვისი 1 რეგიონში მუშაობს 87.5–108 მჰც სიხშირულ ზოლში, რომელიც უშუალოდ ესაზღვრება სამოქალაქო ავიაციისთვის გამოყოფილ რადიოსიხშირულ ზოლს (108–118 მჰც). შედეგად, შეზღუდულ არეალში ერთდროულად მოქმედი სადგურების სიმრავლე ზრდის მომიჯნავე სიხშირეებს შორის ე.მ. ხელშეშლის რისკს, რომელთაგან ყველაზე კრიტიკულია ინტერმოდულაციური დამახინჯება [8,9].

ბულგარეთში რუსეს უნივერსიტეტის სატელეკომუნიკაციო დეპარტამენტში ჩატარებული კვლევა [29], წარმოადგენს ინტერმოდულაციური სიგნალების ზეგავლენის მნიშვნელოვან მაგალითს საკურსო რადიოშუქურის რადიომიმღებზე (ILS-LOC). კვლევაში განხილულია, თუ როგორ შეუძლია ახლომდებარე მაღალი სიმძლავრის სამამუწყებლო რადიოსადგურების მიერ წარმოქმნილ არაწრფივ კომბინირებულ სიგნალებს წარმოქმნას ე.მ. ხელშეშლა, რომელიც საფრთხეს უქმნის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი რადიოსანავიგაციო სისტემების საიმედო ფუნქციონირებას.

რადიოსანავიგაციო სისტემებში ინტერმოდულაციური დამახინჯება წარმოადგენს მრავალი სიგნალის არასასურველ კომბინაციას არაწრფივ

მოწყობილობაში, რომელსაც შეუძლია ე.მ. ხელშეშლის გამოწვევა ახლომდებარე რადიომიმღებებში. ინტერმოდულაციის უმეტესი ნაწილი ვითარდება გადამცემის არაწრფივ სიმძლავრის გამაძლიერებელში, ხოლო რადიომიმღების პირველი კასკადი (Front-End) წარმოადგენს ინტერმოდულაციის მოქმედების ძირითად ზონას [4,75,76].

ინტერმოდულაციური პროდუქტები შეიძლება მოხვდეს მეზობელ რადიოარხებზე მომუშავე რადიომიმღებების სიხშირეებზე და გამოიწვიოს სერიოზული ე.მ. ხელშეშლა საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში. წრფივი სისტემები ინარჩუნებენ შემავალი სიგნალის ძირითად მახასიათებლებს, ხოლო არაწრფივი სისტემები წარმოქმნიან დამატებით სიხშირულ კომპონენტებს ჰარმონიკებს [4,27].

ILS-LOC რადიომიმღებში არაწრფივობის შედეგად არასასურველი ჰარმონიკები წარმოქმნიან ე.მ. ხელშეშლას 90 და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალებისთვის და ამცირებენ რადიომიმღების სიზუსტეს. ინტერმოდულაციური ხელშეშლა კი წარმოიშობა გადამტანი სიგნალების არაწრფივი შერევით, რის შედეგადაც, მიღებული პროდუქტები ILS-LOC რადიომიმღების სამუშაო სიხშირულ არხში ხვდება.

კვლევის პროცესში დადგინდა თუ როგორ შეუძლია 87.5–108 მჰც დიაპაზონში მოქმედ რადიოსადგურებს წარმოქმნან ისეთი ინტერმოდულაციური სიგნალები, რომლებიც ხელს შეუშლის სამოქალაქო ავიაციის სისტემების მუშაობას (108–137 მჰც) [4, 27].

სადისერტაციო კვლევის პროცესი წარიმართა ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირისა (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) რეკომენდაციების გათვალისწინებით [6,7]. რადიოსიხშირული სპექტრის მართვის პოლიტიკის, მსოფლიო და რეგიონული რადიოკონფერენციების საფუძველზე, ასამბლეების სამუშაო ჯგუფების მიერ შემუშავებული რეკომენდაციებისა და საკონფერენციო დოკუმენტების გათვალისწინებით, აღსანიშნავია:

- ITU-ს საკონფერენციო დოკუმენტები, რეგიონული ადმინისტრაციული კონფერენციის დასკვნითი მასალები: „VHF დიაპაზონში FM ხმოვანი

რადიომაუწყებლობისთვის (რეგიონი 1 და რეგიონი 3-ის გარკვეული ქვეყნები). პირველი სესია (ჟენევა, 1982): კონფერენციის მეორე სესიისთვის მომზადებული ანგარიში (ჟენევა, 1982)[73],

- ყოფილი რადიოსაკონსულტაციო საერთაშორისო კომიტეტის (Ex-CCIR) დოკუმენტები (დიუსელდორფი, 1990): ანგარიში 929-2 და ანგარიში 1198 ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (EMC) განსაზღვრა FM რადიომაუწყებლობის სერვისსა (87–108 მჰც სიხშირულ ზოლში) და საავიაციო რადიოსერვისებს (108–137 მჰც სიხშირულ ზოლში) შორის [74].

ITU-ს მიერ შემუშავებული რეკომენდაციები ვრცელდება FM მაუწყებლობის სერვისზე VHF დიაპაზონის სიხშირულ ზოლში (87–108 მჰც) და ავიაციისთვის განკუთვნილ რადიოსერვისებზე 108–137 მჰც. ამ დოკუმენტის მიზანია ამ ორ სერვისს შორის ელექტრომაგნიტური თავსებადობის კრიტერიუმების, მეთოდებისა და ტექნიკის განსაზღვრა, რაც აუცილებელია სამაუწყებლო რადიოსადგურებისა და საავიაციო რადიოსისტემების უსაფრთხო და საიმედო ერთდროული ფუნქციონირებისათვის [4, 7].

ITU-ს რადიოსაკომუნიკაციო ასამბლეამ აღნიშნა, რომ სპექტრის გამოყენების ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად საჭიროა: ე.მ. თავსებადობის შეფასების კრიტერიუმების დახვეწა, კერძოდ, რადიომიმღებების შერჩევითობის (სელექტურობის), ე.მ. ხელშეშლის მიმართ მგრძობიანობის, მინიმალური დაცვის ინტერვალებისა, დაცვითი თანაფარდობების და სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობების დაზუსტება[6].

ამრიგად, ITU-ს დოკუმენტები წარმოადგენს საფუძველს თანამედროვე კვლევებისა და რეგულაციებისათვის, რომლებიც ეხება FM მაუწყებლობისა და საავიაციო რადიოსანავიგაციო სისტემების ურთიერთქმედებას, ე.მ. თავსებადობის კრიტერიუმებსა და ე.მ. ხელშეშლის თავიდან აცილების გზებს [6, 9].

ელექტრომაგნიტური თავსებადობის განსაზღვრისათვის სიხშირულად მოდულირებულ (FM) რადიომაუწყებლობასა და საჰაერო ნავიგაციის სერვისებს შორის ICAO-ს მიერ შემოთავაზებულია სახელმძღვანელო რადიოსიხშირული სპექტრის მოთხოვნების შესახებ სამოქალაქო ავიაციისთვის. ტომი II: რადიოსიხშირის

მინიჭების დაგეგმვის კრიტერიუმები საავიაციო რადიოკავშირისა და რადიოსანავიგაციო სისტემებისთვის. მე-2 გამოცემა. მონრეალი, კანადა: საერთაშორისო სამოქალაქო ავიაციის ორგანიზაცია (2022) [71].

ICAO-ს სტანდარტების (დანართი 10, ტომი I, 2023 წ.) თანახმად, განსაზღვრულია ILS-LOC რადიომიმღების მდგრადობის მოთხოვნები VHF FM რადიომაუწყებლობის სიგნალების მიმართ. აღნიშნული რეგულაცია ითვალისწინებს ადეკვატურ მდგრადობას მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტების ზემოქმედების მიმართ, რათა უზრუნველყოფილი იქნას რადიომიმღების საიმედო ფუნქციონირება და ფრენის უსაფრთხოება განსაზღვრულ სიხშირულ დიაპაზონში. სტანდარტის მიზანია ILS-LOC აპარატურის დაცვა FM მაუწყებლობიდან წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური ხელშემშლებისგან და ისეთი პირობების შექმნა, რომელთა დროსაც რადიომიმღები შეძლებს გამართულ მუშაობას არასასურველი სიგნალების ზემოქმედების პირობებში [4, 9].

ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის (ITU) და სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) რეკომენდაციებსა და დეკლარაციებში, განსაზღვრულია საჰაერო რადიოსანავიგაციო სისტემებზე მოქმედი A და B ტიპის ე.მ. ხელშემშლები [6,7].

ჩატარებული კვლევაში განხილულ იქნა მხოლოდ B1 და B2 ტიპის ე.მ. ხელშემშლების ზემოქმედება ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე.

B ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლა: B ტიპის ე.მ. ხელშემშლა წარმოიქმნება საჰაერო ხომალდის საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში, როდესაც რადიომიმღებზე მიიღება მინიმუმ ორი სამაუწყებლო სიგნალი. შედეგად წარმოიქმნება ინტერმოდულაციური და სხვა არასასურველი კომპონენტები, რომლებიც აღწევენ ILS-LOC-ის სასურველ სიხშირულ ზოლში და იწვევენ ელექტრომაგნიტურ ხელშემშლას.

B1 ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლა: B1 ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლა არის ინტერმოდულაციური დამახინჯება, რომელიც წარმოიქმნება საჰაერო ხომალდის რადიომიმღებში. ეს ხელშემშლა ხდება მაშინ, როდესაც ორი ან მეტი FM სამაუწყებლო სიგნალის მიღების შედეგად ILS-LOC რადიომიმღები გადადის

არაწრფივ მდგომარეობაში. ამ დროს მიღებული სიგნალები ერთმანეთს ერევა და წარმოქმნის ინტერმოდულაციურ პროდუქტებს, რომლებიც შემდეგ უკვე ხვდება ILS-LOC-ის სამუშაო სიხშირულ ზოლში [6].

ინტერმოდულაციური ხელშეშლის წარმოსაქმნელად ერთ-ერთ სამაუწყებლო სიგნალს არასასურველ კომპონენტს უნდა გააჩნდეს საკმარისი ამპლიტუდა, რათა რადიომიმღები გადაიყვანოს მუშაობის არაწრფივ გარემოში, მაგრამ ე.მ ხელშეშლა შეიძლება წარმოიქმნას დაბალი ამპლიტუდის სიგნალების ზემოქმედების შედეგადაც. [75,76] გარდა სიგნალის სიმძლავრისა, ასეთი ხელშეშლის წარმოქმნისთვის საჭიროა არსებობდეს FM მაუწყებლობის არხების სიხშირეებს შორის ისეთი თანაფარდობა, რომელიც წარმოქმნის ინტერმოდულაციურ (IMD) პროდუქტს იმ სიხშირულ არხში, რომელსაც საავიაციო რადიომიმღები იყენებს. ყველაზე დამაზიანებელია მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რომლებიც წარმოიქმნება შემდეგი დამოკიდებულებით [4, 6, 8, 75,76]:

$$F_{\text{ინტერ}} = 2f_1 - f_2 \text{ ორი სიგნალის შემთხვევაში,}$$

$$F_{\text{ინტერ}} = f_1 + f_2 - f_3 \text{ სამი სიგნალის შემთხვევაში.}$$

სადაც:

$F_{\text{ინტერ}}$ - არის მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტის სიხშირე (მჰც),

ხოლო f_1, f_2, f_3 - სამაუწყებლო სიხშირეები (მჰც).

B2 ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა: თუ FM მაუწყებლობის სიგნალის სიმძლავრე სანავიგაციო რადიომიმღების შესასვლელში ზედმეტად მაღალია, შესაძლოა გამოიწვიოს რადიომიმღების პირველი კასკადის (Front-End) გადატვირთვა, რაც თავის მხრივ, რადიომიმღების მგრძობელობის შემცირებას იწვევს. ეს ფენომენი ცნობილია როგორც B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა და ხდება მაშინ, როდესაც შემავალი სიგნალის სიმძლავრე უახლოვდება ILS-LOC რადიომიმღებისთვის განსაზღვრულ მაქსიმალურ შემავალ სიმძლავრეს, რის შედეგადაც ის ვერ ახერხებს საჭირო სიგნალის გარჩევას [4, 6, 75, 76].

B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლისას, როდესაც საჰაერო ხომალდის რადიომიმღები გადატვირთულია ან განიცდის ჩახშობას ერთი ან რამდენიმე სამაუწყებლო

გადამცემის მაღალი სიმპლავრის სიგნალის გამო, ხდება სანავიგაციო ტონალური სიგნალების (90 და 150 ჰც) მიმართ რადიომიმლების მგრძობელობის შემცირება, რის შედეგადაც, რადიომიმლები ვერ ახერხებს მათ ამოცნობას [6, 7,75 76].

პირველი თავის დასკვნა

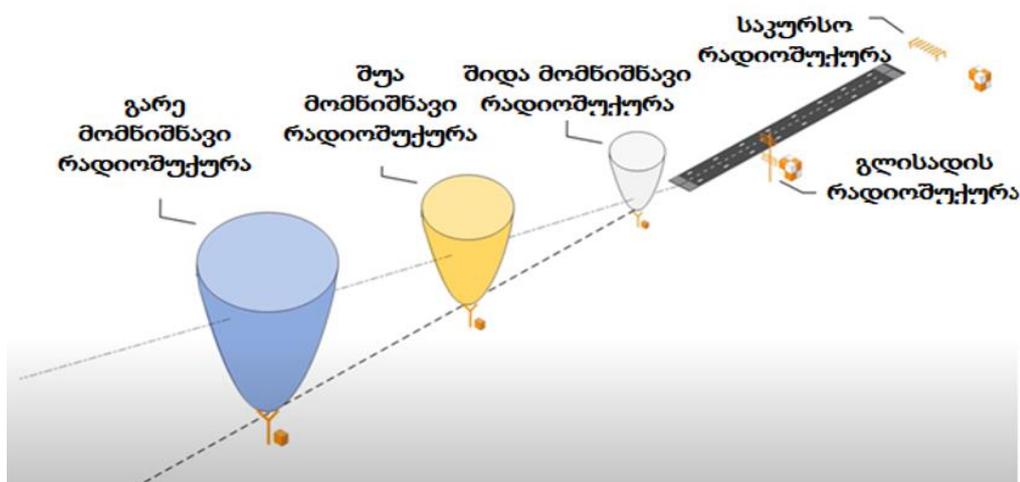
სამოქალაქო ავიაციის რადიოსანავიგაციო მოწყობილობებზე, მათ შორის, ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის ხშირი პრობლემის გათვალისწინებით, ნაშრომის პირველ თავში შესწავლილია ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მოქმედი ე.მ. ხელშეშლის თეორიული საფუძვლები. კვლევის ფარგლებში კლასიფიცირებულია ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის კატეგორიები და გაანალიზებულია მათი წარმოქმნის წყაროები და უარყოფითი გავლენა ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე.

წარმოდგენილია ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის (ITU) მიერ შესრულებული ე.მ. ხელშეშლების კლასიფიკაცია და დეტალურად არის აღწერილი, როგორც ე.მ. ხელშეშლის ტიპებს შორის განსხვავება, ასევე მათი წარმოქმნის მექანიზმები. აღნიშნული კლასიფიკაციის მიხედვით, გაანალიზებულია B1 ტიპისა და B2 ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშეშლები.

თავი 2. საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ფუნქციონალური მოდელი

2.1 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) შემადგენელი კომპონენტები

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემა (ILS) წარმოადგენს საიმედო რადიოსანავიგაციო საშუალებას, რომელიც ათწლებლებია გამოიყენება საჰაერო ნავიგაციაში. იგი შედგება სამი ძირითადი კომპონენტისგან: საკურსო რადიოშუქურა (LOC), გლისადის რადიოშუქურა (GS) და მომნიშვნელი რადიოშუქურები [4, 16].



ნახ. 2.1.1 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) შემადგენელი კომპონენტები [16]

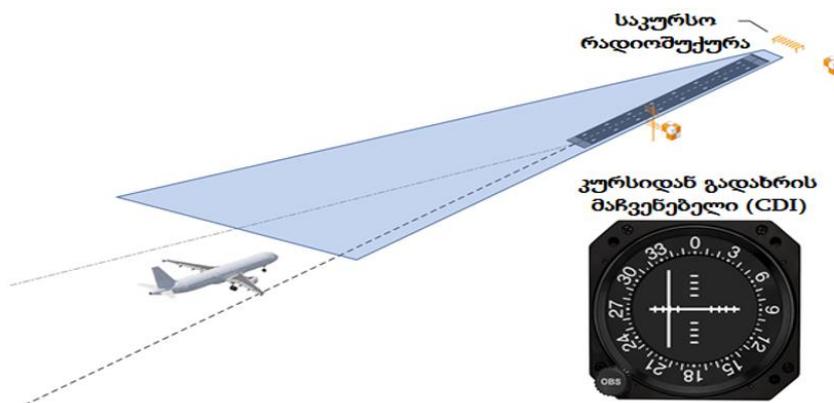
საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სისტემა შედგება აეროპორტში განთავსებული გადამცემისგან, რომელიც სისტემის სამუშაო ზონაში სივრცულ მოდულაციას ქმნის და საჰაერო ხომალდში განთავსებული რადიომიმღებისაგან, რომელიც იღებს სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს და, შესაბამისად, იწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI - Course Deviation Indicator) გადახრას [16].

ILS-LOC უზრუნველყოფს ჰორიზონტალურ სიბრტყეში სანავიგაციო მითითებებს. მისი ფუნქციონირება დაფუძნებულია ამპლიტუდური მოდულაციის (AM) პრინციპზე, უფრო კონკრეტულად კი იყენებს AM მოდულაციის ტექნიკას ორი გვერდითი ზოლით და შეზღუდული გადამტანით (AM-DSB-SC). ILS-LOC-ის სიგნალები გამოსხივდება 108.10–111.95 მჰც სიხშირეთა ზოლში [15].

საკურსო რადიომუქურის მუშაობის საფუძველში დევს ორი AM მოდულირებული სანავიგაციო ტონალური სიგნალის ამპლიტუდების შედარება: ერთი მათგანი მოდულირებულია 90 ჰც, ხოლო მეორე 150 ჰც სანავიგაციო ტონალური სიგნალებით [2, 3,75,76].

ეს სიგნალები გადაიცემა ILS-LOC სისტემის სამუშაო ზონაში სიმპლექსური კომუნიკაციის უზრუნველსაყოფად. ისინი გამოსხივდება ორი ურთიერთნაწილობრივი გადაფარული სხივების სახით, რომლებიც სიმეტრიულადაა წანაცვლებული ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალური ხაზის მიმართ. AM-ის გამოყენება საშუალებას იძლევა, რომ ILS-LOC-ის სიგნალები მინიმალური შეფერხებით გავრცელდეს, რითაც უზრუნველყოფილია მაღალი სიზუსტის მოთხოვნები. საკურსო რადიომუქურა ასევე ასხივებს მაიდენტიფიცირებელ სიგნალს მორზეს კოდით [16, 17, 75, 76].

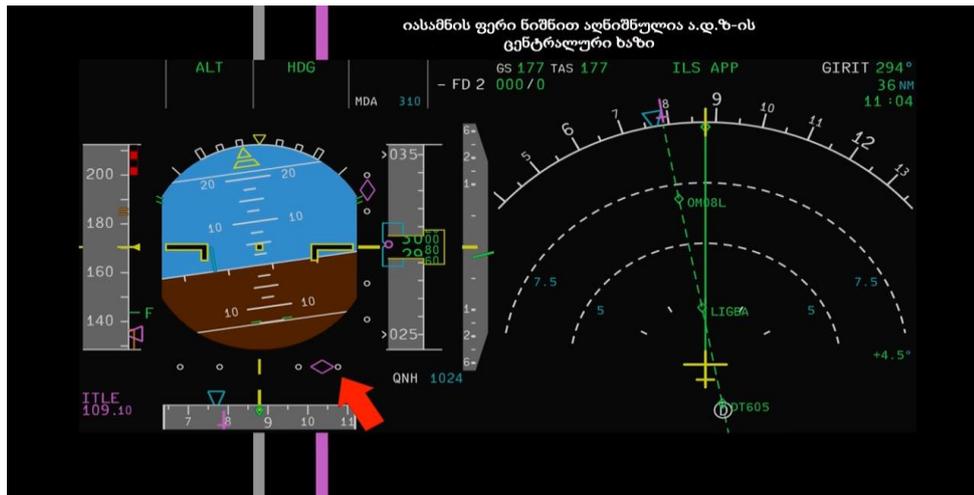
ILS-LOC-ის რადიომიმღები იღებს 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს. საჰაერო ხომალდის ა.დ.ზ.-ის ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით, მდებარეობის მიხედვით, ამ სიგნალებიდან ერთ-ერთი დომინირებს მეორეზე. მფრინავს სანავიგაციო ინფორმაციას აჩვენებს კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი (CDI) [4,16].



ნახ. 2.1.2 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) საკურსო რადიომუქურა და კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი (CDI) [16]

თუ ხომალდი მდებარეობს ცენტრალურ ხაზზე, ის იღებს თანაბარი სიმძლავრის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს.

ILS-LOC-ის კურსის სიგანე არის ის მანძილი, რომელზეც CDI-ის სრული გადახრა მარჯვნივ ან მარცხნივ უნდა მოხდეს. ა.დ.ზ-ის ზღურბლთან სრული გადახრა ხდება ცენტრალური ხაზიდან 106 მეტრის (350 ფუტი) მანძილზე, საერთო სიგანით 213 მეტრი (700 ფუტი). საკურსო რადიოშუქურის სიგანე გრადუსებში დამოკიდებულია ა.დ.ზ-ის სიგრძეზე [17, 16,75,76].



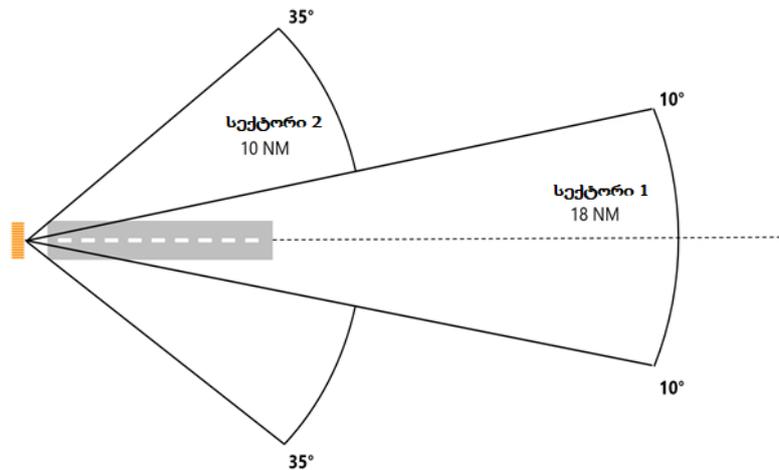
ნახ. 2.1.3 ნახაზზე ნაჩვენებია თუ როგორ იღებს მფრინავი ინფორმაციას ა.დ.ზ.-ის მიმართ საჰაერო ხომალდის მდებარეობის შესახებ

2.2 საკურსო რადიოშუქურის მოქმედების ზონა

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიო შუქურას (ILS-LOC) გააჩნია ე.წ. მოქმედების ზონა (DOC -Designated Operational Coverage), რომელიც დადგენილია სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) მიერ[9].

ქვემოთ მოცემულ ნახაზზე ჩანს, რომ მოქმედების ზონა გაყოფილია ორ სექტორად საკურსო რადიოშუქურისთვის. სექტორი 1, ცენტრალური ხაზის ორივე მხარეს არის 10 გრადუსი და ვრცელდება 33 კილომეტრზე (18 საზღვაო მილი). სექტორი 2, ცენტრალური ხაზის ორივე მხარეს არის 35 გრადუსი და ვრცელდება 18.5 კილომეტრზე (10 საზღვაო მილი) [6, 9, 64,75, 76].

საკურსო რადიოშუქურის მოქმედების ზონა



ნახ. 2.2.1 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემისთვის (ILS) განსაზღვრული მოქმედების ზონა (DOC - Designated Operational Coverage)

2.3 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) კატეგორიები

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის (ILS) კატეგორიზაცია ეფუძნება ორ ძირითად სანავიგაციო პარამეტრს, რომლებიც განსაზღვრავენ ავიაციის უსაფრთხოების მინიმალურ ზღვრებს არახელსაყრელი ამინდის პირობებში [9]:

1. გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH - Decision Height): ეს არის მინიმალური აბსოლუტური სიმაღლე, რომელსაც საჰაერო ხომალდი აღწევს დაფრენის ტრაექტორიაზე. ამ სიმაღლეზე პილოტი ვალდებულია მიიღოს გადაწყვეტილება დაფრენის შესახებ;
2. ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR - Runway Visual Range): ეს პარამეტრი წარმოადგენს ჰორიზონტალური ხილვადობის მანძილს ა.დ.ზ-ის ცენტრალური ხაზის გასწვრივ, რაც მიუთითებს ვიზუალური ნიშნების (მაგალითად, ზოლის განათება) დანახვის შესაძლებლობაზე. [75,76]

• I კატეგორია: გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH) არანაკლებ 60 მეტრისა (200 ფუტი). ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR) არანაკლებ 550 მეტრი (1,800 ფუტი) (ან 730 მეტრი / 2,400 ფუტი, სადაც ეს კონკრეტული მინიმუმია დადგენილი).

- II კატეგორია: გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH) დაბალია 60 მ-ზე (200 ფუტი), მაგრამ არანაკლები, ვიდრე 30 მ (100 ფუტი). ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR) არანაკლებ 365 მ (1200 ფუტი).

- III კატეგორია იყოფა სამ ქვეკატეგორიად:

CAT III A – გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH) 30 მ-ზე (100 ფუტი) დაბალია, ან DH საერთოდ არ არის. ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR) არანაკლებ 213 მეტრი (700 ფუტი).

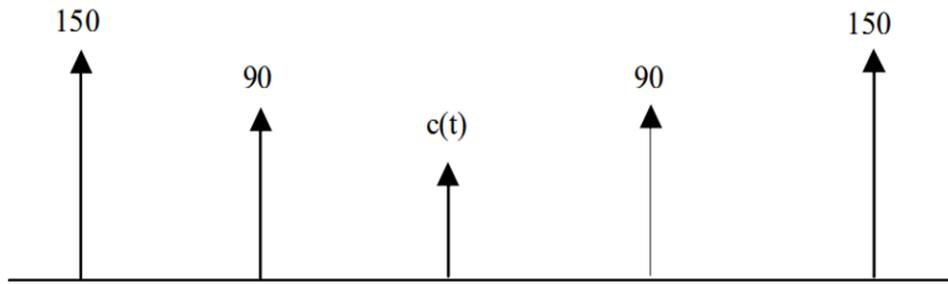
CAT III B - გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH) 15 მ-ზე (100 ფუტი) დაბალია, ან DH საერთოდ არ არის. ასაფრენ -დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR) 45 - 213 მეტრი (150-700 ფუტი) დამოკიდებულია ა.დ.ზ-ის განათებაზე.

CAT III C - გადაწყვეტილების მიღების სიმაღლე (DH) საერთოდ არ არის დაწესებული, ასევე, არც ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე ხილვადობის სიშორე (RVR).

2.4 ამპლიტუდური მოდულაცია ორმაგი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით AM (DSB-SC), როგორც ILS-LOC-ის ფუნქციონირების ძირითადი ტექნოლოგია

ILS-LOC-ის ფუნქციონირება ეფუძნება ამპლიტუდურ (AM) მოდულაციას ორმაგი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით (DSB-SC). აღნიშნული მიდგომა უზრუნველყოფს საინფორმაციო სიგნალის ეფექტურ გადაცემას და შესაძლებლობას იძლევა, ერთდროულად იქნეს მიღწეულ როგორც ენერგეტიკული ეფექტურობა, ისე სიხშირული სპექტრის ოპტიმიზაცია [16, 50].

DSB-SC მოდულირებული სიგნალი შეიცავს მხოლოდ ზედა და ქვედა გვერდით ზოლებს, რომლებიც უშუალოდ ატარებენ სასარგებლო 90 და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს. ეს მოდულაციის ტიპი განსხვავდება სტანდარტული ამპლიტუდური მოდულაციისგან (DSB-FC), რომლის შემთხვევაში გადაცემული ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილი იხარჯება გადამტან კომპონენტზე. DSB-SC მოდულაციის შემთხვევაში მთელი სიგნალის ენერგია კონცენტრირებულია გვერდით ზოლებში, რაც სიმძლავრის გამოყენების თვალსაზრისით მას ენერგოეფექტურ ტექნოლოგიად აქცევს [12, 13]



ნახ. 2.4.1 150 და 90 ჰვ სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები გვერდითი ზოლით და გადამტანით

გადაცემის ეფექტურობა (η) განისაზღვრება როგორც იმ ენერჯის პროცენტული წილი, რომელიც გვერდით ზოლებზე გადადის. ეს მაჩვენებელი გამოიყენება იმ ტიპის მოდულაციისათვის რომელიც იყენებს გადამტან სიგნალს გვერდითი ზოლებით.

ეფექტურობა (η) პირდაპირ კავშირშია მოდულაციის ინდექსთან (μ), რომელიც განსაზღვრავს მოდულაციის ინტენსივობას გადამტან სიგნალზე; რაც უფრო მაღალია მოდულაციის ინდექსი, მით უფრო მეტია გვერდითი ზოლების სიმძლავრე, რაც ნიშნავს, რომ უფრო მეტი სიმძლავრე გადაიცემა სასარგებლო შეტყობინებაზე. სტანდარტული AM სისტემისთვის ეფექტურობა გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\eta = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2} \times 100\% , \quad (2.4.1)$$

სადაც η წარმოადგენს მოდულაციის ეფექტიანობას, ანუ მოდულირებული სიგნალის ენერჯის იმ ნაწილს, რომელიც შეიცავს სასარგებლო საინფორმაციო შინაარსს, ხოლო μ არის მოდულაციის ინდექსი. თუმცა, ასეთი გადაცემა ნაკლებად ეფექტურია, რადგან, ენერჯის ორი მესამედი იხარჯება გადამტან კომპონენტზე, რომელიც არ შეიცავს ინფორმაციას. [75,76]

შესაძლებელია გადამტანის ჩახშობა და სიმძლავრის გადანაწილება ორ გვერდითა ზოლზე. ასეთ გადაცემას ეწოდება გადაცემა ორი გვერდითა ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით (DSB-SC). DSB-SC ტექნოლოგია, გამოიყენება რადიოსისტემებში, სადაც ენერჯის ეფექტურობა და არსებული სიხშირული რესურსის ოპტიმიზაცია უმნიშვნელოვანესია. [75,76]

ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სიტემის სანავიგაციო სიგნალის SBO კომპონენტი იყენებს ამ ტიპის ამპლიტუდურ (AM) მოდულაციას.



ნახ. 2.4.2 150 და 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები გვერდითი ზოლით, სადაც ჩახშობილია გადამტანი (SBO)

მათემატიკური ფორმით სიგნალი ორი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით (DSB-SC) ჩაიწერება შემდეგი ფორმულით:

$$s(t) = m(t)c(t) \Rightarrow s(t) = A_m A_c \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2.4.2)$$

მოდულირებული სიგნალი იქმნება ($y(t)$) გადამტანი სიგნალისა და მამოდულირებელი სიგნალის გამრავლების შედეგად. DSB-SC-ში გადამტანი ჩახშობილია და მხოლოდ გვერდითი ზოლები (ზედა და ქვედა) გადაიცემა: [1,75,76

$$y(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t), \quad (2.4.3)$$

სადაც $A_c m(t)$ წარმოადგენს გადამტანი სიგნალის მოდულირებას მამოდულირებელი სიგნალით და $\cos(2\pi f_c t)$ გადამტანი სიგნალის ტალღას. გადამტანი სიხშირე გამრავლდება მამოდულირებელ სიგნალზე. DSB-SC მოდულაციის ტექნიკის გამოყენება ამცირებს ჰარმონიკების და სხვა მავნე სიგნალების წარმოქმნის ალბათობას [14,76].

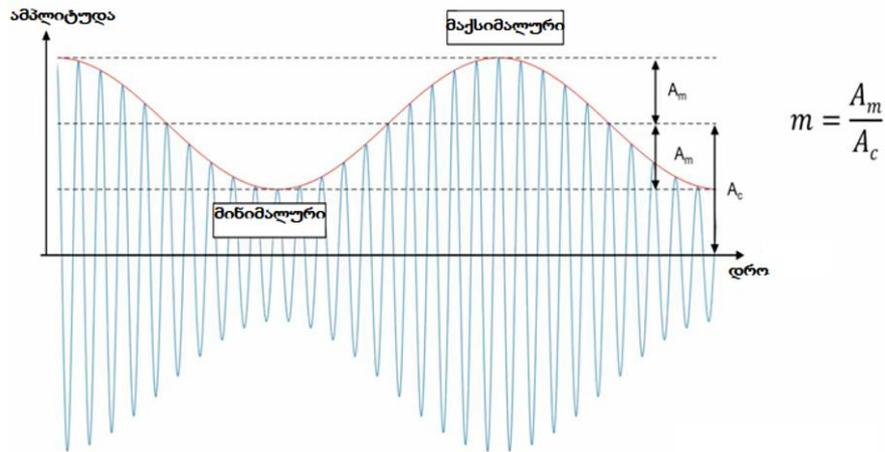
DSB-SC სიგნალის კიდევ ერთი საინტერესო მახასიათებელია ის, რომ გადამტანი ცვლის ფაზას, როდესაც მამოდულირებელი სანავიგაციო ტონალური სიგნალი გადის 0-ზე. აუცილებელია გადამცემის და მიმღების სინქრონიზებული მუშაობა DSB-SC სიგნალით მუშაობისას, ანუ გადამტანი სიგნალის ოსცილატორები უნდა მუშაობდეს სინქრონიზებულად, რაც ნიშნავს, რომ სიგნალის სიხშირე და ფაზა უნდა იყოს

იდენტური, რათა შესაძლებელი იყოს ზუსტი დემოდულაცია. სხვა შემთხვევაში, სიგნალი შეიძლება დემოდულაციისას დაზიანდეს ან საერთოდ დაიკარგოს [13,75,76].

ILS-LOC-ის მოდულირებული სიგნალის შესაბამისი მაღალი და დაბალი პიკური მნიშვნელობები იზომება ე.წ. მოდულაციის ინდექსით, რომელიც არის ამპლიტუდების თანაფარდობა ანუ საბაზისო ტონალური სანავიგაციო მამოდულირებელი სიგნალის ამპლიტუდის შეფარდება გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდასთან.

მოდულაციამდე მთელი სიმძლავრე კონცენტრირებულია გადამტან სიხშირეზე. მოდულაციის პროცესი ქმნის ორ გვერდით ზოლს: ქვედა გვერდითი ზოლი (LSB) და ზედა გვერდითი ზოლი (USB).

თუ მოდულაციის ინდექსი არის 100%, გადამტანი შეიცავს ენერჯის 66%-ს და თითოეული გვერდითი ზოლი 17%-ს. როდესაც 108.1 მჰც გადამტანი სიგნალი მოდულირებულია 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალით, ქვედა გვერდითი ზოლი იქმნება 108.1 მჰც - 150 ჰც, ხოლო ზედა გვერდითი ზოლი 108.1 მჰც + 150 ჰც. რაც უფრო დიდია მოდულაციის ინდექსი, მით უფრო დიდია გადამტანიდან გვერდით ზოლებზე გადაცემული სიმძლავრე და მით უფრო დაბალია გადამტან სიხშირეზე დარჩენილი სიმძლავრე. საკურსო რადიოშუქურის სიგნალი მოდულირებულია ორი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის გამოყენებით (90 და 150 ჰც), ამიტომ თითოეული გვერდითი ზოლის სიმძლავრე გაყოფილია ორად ამ ორ სანავიგაციო ტონალურ სიგნალზე [4, 31,75,76].



ნახ. 2.4.3 ამპლიტუდურად მოდულირებული სიგნალი მოდულაციის ინდექსით 0.5 [30]

საკურსო რადიოშუქურის სიგნალის მოდულაციის ინდექსი არის 20%. ამპლიტუდური სიგნალის მოდულაციის ინდექსი დროით განზომილებაში გამოისახება შემდეგნაირად [12, 15,75,76]:

$$s(t) = A_c \left[1 + \left(\frac{A_m}{A_c} \right) \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_c t) \quad (2.4.4)$$

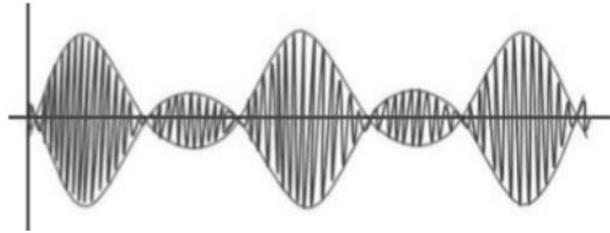
$$\Rightarrow s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t),$$

სადაც: μ არის მოდულაციის ინდექსი და ის უდრის მამოდულირებელი ტონალური სიგნალის ამპლიტუდის შეფარდებას. გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდასთან ეს დამოკიდებულება მათემატიკურად ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\mu = \frac{A_m}{A_c}, \quad (2.4.5)$$

სრულყოფილი მოდულაციისთვის, მოდულაციის ინდექსის მნიშვნელობა უნდა იყოს მაქსიმუმ 1-ის ტოლი, რაც გულისხმობს, რომ მოდულაციის პროცენტი უნდა იყოს 100%. თუ მოდულაციის ინდექსის მნიშვნელობა ერთზე მეტია, მაშინ ხდება ეგრეთ წოდებული ზემოდულაცია.

როდესაც მოდულაციის სიღრმე მეტია ერთზე(ზემოდულაცია)



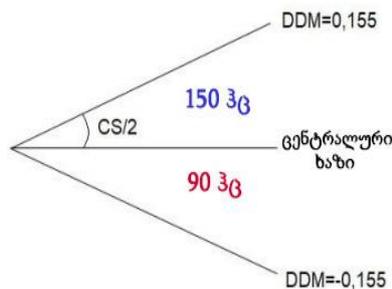
ნახ. 2.4.4 ზემოდულაცია

როდესაც, მოდულაციის ინდექსის მნიშვნელობა იზრდება და მისი მნიშვნელობა ხდება ერთზე მეტი, გადამტანი განიცდის 180 გრადუსიანი ფაზის შებრუნებას, რაც იწვევს დამატებით გვერდით ზოლებს და სიგნალის დამახინჯებას. ასეთი ზედმეტად მოდულირებული სიგნალი გადაიქცევა ე.მ. ხელშეშლად, რომლის სრულად აღმოფხვრა შეუძლებელია [4, 13, 15,75,76].

საკურსო რადიოშუქურის მუშაობის საფუძველია 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს შორის მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა (DDM), რაც განსაზღვრავს, კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის ჩვენებას თუ სად იმყოფება საჰაერო ხომალდი. სექტორი, რომელშიც კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) მაქსიმალური გადახრა შესაძლებელია ორივე მიმართულებით, კურსის სექტორი (CS) ეწოდება, რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\text{კურსის სექტორი} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{105}{a} \right), \quad (2.4.6)$$

მანძილი საკურსო რადიოშუქურასა და ზღურბლს შორის (d) განსაზღვრავს კურსის სექტორის სიდიდეს. ICAO-ის მიხედვით, კურსის სექტორი 3°-დან 6°-მდე მერყეობს, ხოლო მისი საზღვრებზე DDM-ის მნიშვნელობა 0.155 უნდა იყოს [4, 18, 56, 75, 76].

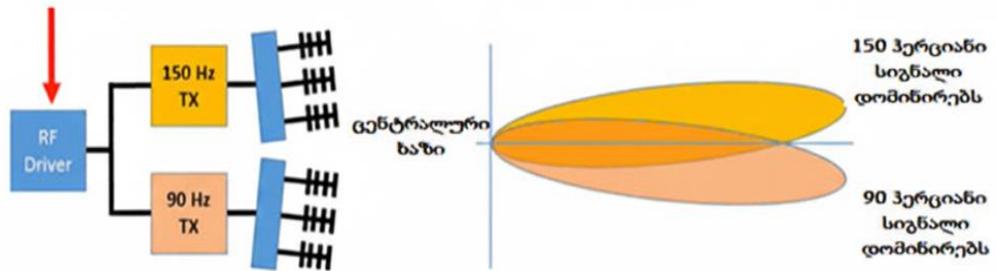


2.5 ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიოგადამცემი და სივრცითი მოდულაცია

ILS-LOC რადიოსისტემაში სივრცითი მოდულაციის შესაქმნელად გამოიყენება ორი ამპლიტუდურად მოდულირებული (AM) რადიოგადამცემი, რომლებიც მუშაობენ ზემალაღი სიხშირის (VHF) დიაპაზონში (108.10 მჰც – 111.95 მჰც) 50 კჰც ინტერვალით. ორივე რადიოგადამცემები იყენებს ერთსა და იმავე რადიოსიხშირულ წყაროს (კრისტალურ ოსცილატორს), რომელიც სიხშირის გამრავლების კასკადებით VHF სიხშირეს აღწევს. [75,76]

ორივე რადიოგადამცემის მიერ ერთი და იმავე სიხშირული წყაროს გამოყენება უზრუნველყოფს გამოსხივებული სიგნალების სინქრონიზებულად დარჩენასა და თანმიმდევრული (კოჰერენტული) გადაცემის შექმნას. AM რადიოსისტემებში კოჰერენტული გადაცემა გულისხმობს მეთოდს, როცა ორი ან მეტი სიგნალი სინქრონიზებულია ისე, რომ მათ შორის ფაზური დამოკიდებულება შენარჩუნებულია, მიუხედავად იმისა, რომ მათ განსხვავებული მამოდულირებელი სიხშირეები აქვთ [4, 16, 17, 75,76]. ეს გადაცემები კვებავს ორ მიმართულ ანტენათა მასივს, რომლებიც განთავსებულია ა.დ.ზ-ის ცენტრალური ხაზის ორივე მხარეს. ანტენათა მასივები შედგება რამდენიმე ლოგარითმული პერიოდული ანტენებისგან, რომლებიც ფიზიკურად ისე უნდა განთავსდეს, რომ მიმართულების დიაგრამის პიკური მნიშვნელობა ცენტრალური ხაზის ერთ ან მეორე მხარეს იყოს. ერთი სანავიგაციო ტონალური სიგნალი მოდულირებულია 150 ჰც სიხშირეზე, ხოლო მეორე 90 ჰც სიხშირეზე, რის შედეგადაც, გადაფარვის არეში წარმოიქმნება სივრცითი მოდულაცია, სადაც მოდულაციების შედარებითი ამპლიტუდა იცვლება ცენტრალური ხაზიდან გადახრის კუთხის მიხედვით, ცენტრალური ხაზის გასწვრივ ამპლიტუდები თანაბარია [17, 75, 76].

ორივე გადამცემი იყენებს ერთ რადიოსიხშირულ წყაროს

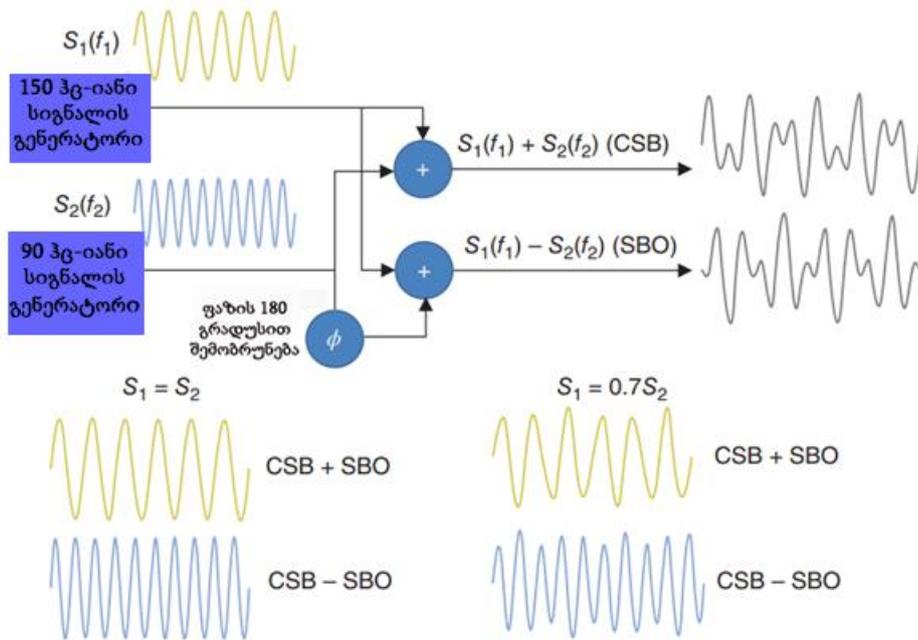


თითოეული სანავიგაციო ტონალური სიგნალის მოდულაციის ინდექსთა მნიშვნელობები იცვლება ა.დ.ზ -ის ცენტრალური ხაზიდან საჭირო ხომალდის მდებარეობის მიხედვით

ნახ. 2.5.1 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიოგადამცემი [17]

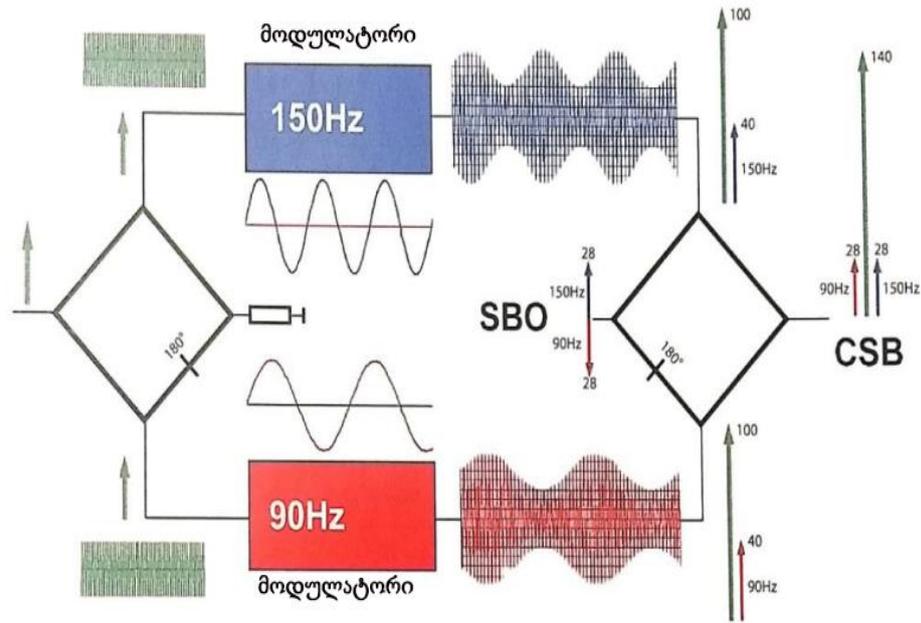
თანამედროვე საკურსო რადიოშუქურა (ILS-LOC) საჭირო სივრცითი მოდულაციისათვის იყენებს ამპლიტუდურად მოდულირებულ (AM) CSB (carrier and side bands) და SBO (side bands only) სიგნალს. CSB ნიშნავს გადამტან სიგნალს გვერდითი ზოლებით, ხოლო SBO სიგნალს მხოლოდ გვერდითი ზოლებით [17].

სივრცითი მოდულაციის მისაღწევად, თითოეული ანტენების ჯგუფის მიერ გამოსხივებული სიგნალი აერთიანებს ორივე ამპლიტუდურად მოდულირებულ (AM) სიგნალს (90 და 150 ჰც). თუ $S_1(f_1)$ არის 90 ჰც სიხშირის სიგნალი და $S_2(f_2)$ 150 ჰც სიხშირის სიგნალი მაშინ ერთ კომბინაციას წარმოადგენს S_1+S_2 , რაც მოიხსენება როგორც გადამტანი სიგნალი ორი გვერდითი ზოლით (CSB), ხოლო მეორე S_1-S_2 , როგორც სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO). სხვაობა შესაძლებელია S_2 -ის ფაზის შებრუნებით მის S_1 -თან დამატებამდე და ორივე სიგნალი შეიძლება გენერირდეს კოჰერენტულად (თანმიმდევრულად). აღსანიშნავია, რომ თუ S_1 და S_2 იდენტურია, მაშინ CSB და SBO სიგნალების ჯამით მიიღება 90 ჰც სიხშირის სიგნალის მოდულაცია, ხოლო მათი სხვაობით 150 ჰც სიხშირის სიგნალის მოდულაცია [4, 50].



ნახ. 2.5.2 სანავიგაციო ტონალური სიგნალების (CSB და SBO) წარმოქმნა და მოდულაციის ინდექსთა განსაზღვრა [50]

გადამტანი სიგნალის და ორი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის შეკრებისას ვიღებთ გადამტან სიგნალს ორმაგი გვერდითი ზოლით (CSB), სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO) მიიღება ანალოგიური მეთოდით, მაგრამ 150 კც სანავიგაციო ტონალური სიგნალი ფაზაში არის 180 გრადუსით შებრუნებული. 150 კც სიგნალი იცვლება ფაზაში, ხოლო 90 კც სიგნალი ფაზაში ფიქსირებულია [4, 17, 21,75, 76].

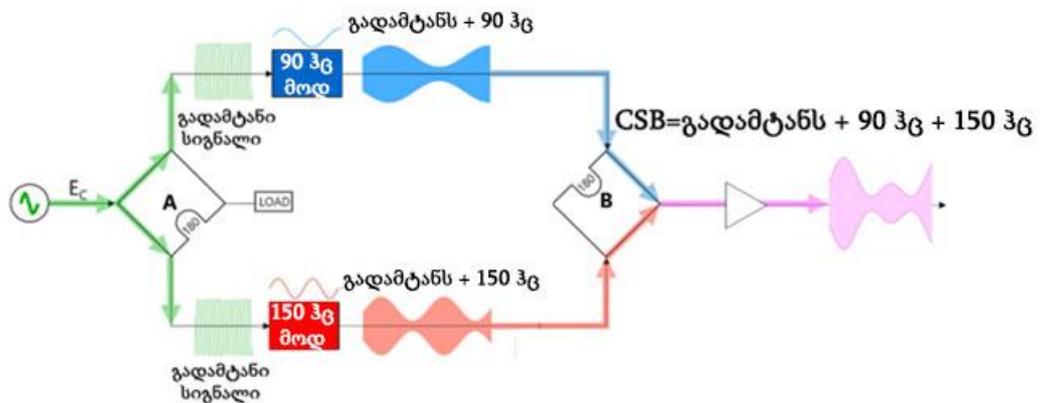


ნახ. 2.5.3 CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) და SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალების ფორმირება და ფაზური ურთიერთქმედება [18]

SBO სიგნალის შემთხვევაში სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ფაზაში არ არის, არამედ წანაცვლებულია 180 გრადუსით. შედეგად, 90 ჰც სანავიგაციო ტონალური სიგნალები CSB-სა და SBO-ს შორის ფაზაში ემთხვევა, ხოლო 150 ჰც სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ერთმანეთის მიმართ საპირისპირო ფაზაში არიან. რადგან CSB სიგნალში 90 და 150 ჰც სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ერთმანეთის მიმართ ფაზაშია, მისი მოქმედების ზონის ნებისმიერ წერტილში მოდულაციის ინდექსების სხვაობა ნულს უტოლდება. ნულოვანი DDM მიუთითებს, რომ თვითმფრინავი მდებარეობს ასაფრენი ზოლის ცენტრალურ ხაზზე. შესაბამისად, მხოლოდ CSB სიგნალი არ არის საკმარისი, რადგან სივრცულ პოზიციებზე განსხვავებული მითითებების მისაწოდებლად აუცილებელია SBO-ს დამატება.

SBO სიგნალი წარმოიქმნება დაბალანსებული მოდულატორის საშუალებით, რომელიც სრულად ამოიღებს გადამტანს და ტოვებს მხოლოდ გვერდით ზოლებს. სიგნალის სიმძლავრე კონტროლდება ცვლადი დამაქვეითებლით (attenuator), რომელიც ასევე არეგულირებს კურსის სიგანეს, ხოლო 90° ფაზის გადამყვანი უზრუნველყოფს CSB და SBO სიგნალების სწორ ფაზურ კომბინაციას.[75,76]

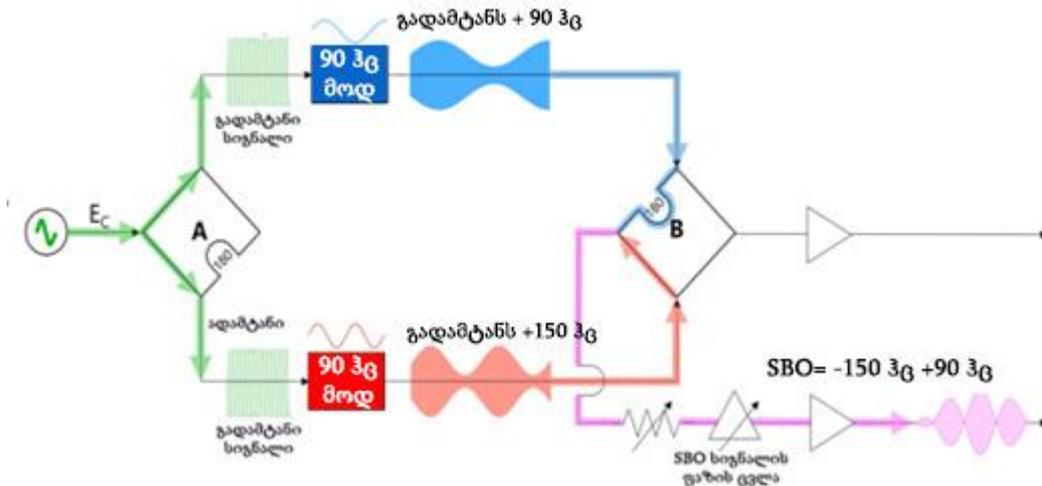
გადამცემის მუშაობის პრინციპის შეჯამებით წარმოდგენილია გადამცემის გამარტივებული ბლოკ-სქემა, რათა გავიგოთ, თუ როგორ იქმნება CSB და SBO სიგნალები. ამ სქემაში გვაქვს დაბალი სიმძლავრის ოსცილატორი, რომელიც წარმოქმნის გადამტან სიხშირეს ორი ჰიბრიდული მიქსერი (შემრევი) და ორი მოდულატორი 90 და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალებისთვის. CSB სიგნალის მისაღებად, გადამტანი სიხშირე გამოდის დაბალი სიმძლავრის ოსცილატორიდან და იყოფა ჰიბრიდული მიქსერის (A) საშუალებით, თითოეულ მოდულატორს სიგნალები მიეწოდება ფაზაში. სანავიგაციო ტონალური სიგნალების (90 და 150 ჰც) მოდულაციის შემდეგ, სიგნალი შედის ჰიბრიდულ მიქსერში (B). ჰიბრიდული მიქსერის (B) შემკრები გამომავალი პორტიდან (summing output) გამოდის სიგნალი, სადაც გადამტანი სიხშირე მოდულირებულია კომბინირებული სიგნალით, სადაც 90 და 150 ჰც სიგნალები არის ფაზაში, რომლებიც გაივლიან გამაძლიერებელში მანამ, სანამ გადაეცემა ანტენათა მასივს [16,75,76].



ნახ. 2.5.4 CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალის მისაღებად გადამცემის გამარტივებული ბლოკ-სქემა [16]

SBO სიგნალისთვის, გადამტანი სიხშირე გამოდის დაბალი სიმძლავრის ოსცილატორიდან და იყოფა ჰიბრიდული მიქსერის (A) საშუალებით, სიგნალები ფაზაში მიეწოდება თითოეულ მოდულატორს. სანავიგაციო ტონალური სიგნალებით მოდულაციის შემდეგ, ისინი გადადიან ჰიბრიდულ მიქსერში (B) სხვაობის გამომავალ პორტზე (difference output). გადამტანი სიხშირე და 150 ჰც სიგნალი ფაზაში

განსხვავებულები არიან; ამ ეტაპზე შეიძლება მოხდეს დამატებითი ამპლიტუდის და ფაზის კორექტირება, სანამ სიგნალი საბოლოოდ გაძლიერდება [4, 16, 17,75,76].



ნახ 2.5.5 SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალის მისაღებად გადამცემის გამარტივებული ბლოკ-სქემა [16]

2.5.1 საჭაერო ხომალდის ჰორიზონტალური კოორდინაციის განსაზღვრის სისტემა

f_1 და f_2 წარმოადგენენ სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს 90 და 150 ჰც სიხშირით. ისინი წარმოადგენენ სიგნალების მყისიერ მნიშვნელობას, მაგალითად, ძაბვას, მაგრამ პრაქტიკაში ისინი დროთა განმავლობაში სინუსოიდურად იცვლებიან ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ანტენათა მასივის წინ. CSB სიგნალს აქვს $m(f_1 + f_2)$ მნიშვნელობა, სადაც m არის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია რადიოგადამცემის სიმძლავრეზე და ანტენის გაძლიერებაზე მოცემულ წერტილში. ანალოგიურად, SBO სიგნალს აქვს $n(f_1 - f_2)$ მნიშვნელობა, სადაც n ასევე დამოკიდებულია რადიოგადამცემის სიმძლავრესა და ანტენის გაძლიერებაზე ამ კონკრეტულ წერტილში თუ CSB და SBO სიგნალების შეკრებისას ან გამოკლებისას ფრჩხილებიდან გამოტანილ იქნება მნიშვნელობები, მაშინ მიიღება შედეგი, სადაც f_1 - ის მნიშვნელობა უფრო დიდია f_2 -ზე, შესაბამისად, 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი უფრო ძლიერია სივრცის ამ წერტილში [4, 17, 22, 54,76].

$$CSB = m(f_1 + f_2) \quad SBO = n(f_1 - f_2)$$

დაჯამებისას

$$\begin{aligned}
 CSB + SBO &= m(f_1 + f_2) + n(f_1 - f_2) \\
 CSB + SBO &= mf_1 + mf_2 + nf_1 - nf_2 \\
 CSB + SBO &= (m + n)f_1 + (m - n)f_2,
 \end{aligned}
 \tag{2.5.1}$$

f_1 არის უფრო ძლიერი, $f_1 > f_2$

სხვაობის შემთხვევაში, იგივე პროცესის განხორციელებისას, f_1 - ის მნიშვნელობა იქნება ნაკლები f_2 - ის მნიშვნელობაზე სივრცის კონკრეტულ წერტილში.[75,76]

$$\begin{aligned}
 CSB &= m(f_1 + f_2) \quad SBO = n(f_1 - f_2) \\
 \text{სხვაობისას} \\
 CSB - SBO &= m(f_1 + f_2) - n(f_1 - f_2) \\
 CSB - SBO &= mf_1 + mf_2 - nf_1 + nf_2 \\
 CSB - SBO &= (m + n)f_1 - (m - n)f_2,
 \end{aligned}
 \tag{2.5.2}$$

f_2 არის უფრო ძლიერი, $f_1 < f_2$

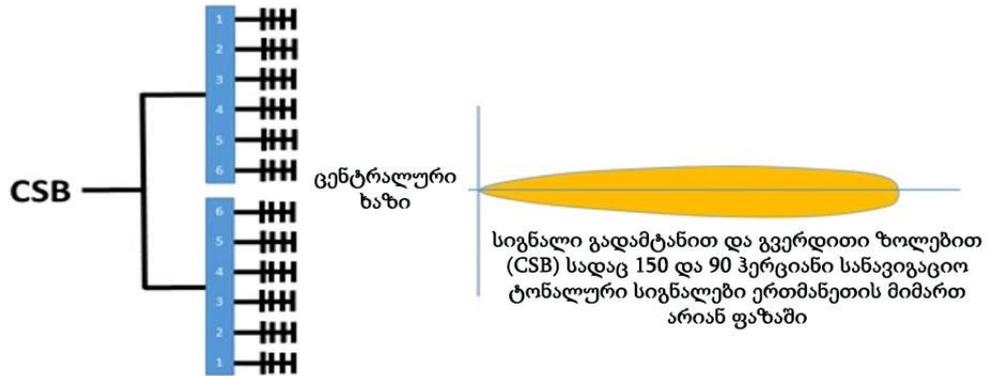
ნახაზი 2.6.1 აჩვენებს საკურსო რადიოშუქურის სიგნალის ცენტრალურ ხაზს. ცენტრალური ხაზის ზევით, CSB და SBO სიგნალებს შორის სხვაობის შესრულებისას ვიღებთ უფრო ძლიერ 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალს ცენტრალური ხაზის მაღლა, ხოლო ქვევით უფრო ძლიერ 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალს CSB და SBO სიგნალების დაჯამებისას [22, 33,75,76].



ნახ. 2.5.1.1 ცენტრალური ხაზის მარჯვნივ 150 ჰც სიხშირის სიგნალი დომინირებს, მარცხნივ კი 90 ჰც სიხშირის სიგნალი [16]

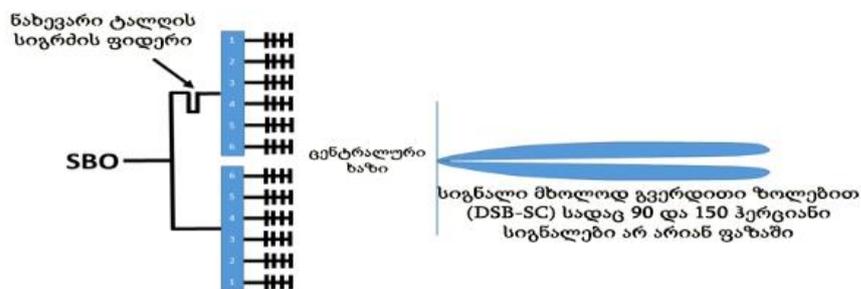
2.5.2 საკურსო რადიოშუქურის ანტენის არასასურველი გვერდითი გამოსხივების გადამფარავი სიგნალისა და საკურსო სიგნალის გამოსხივება

CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალში 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ფაზაში არიან, რათა ცენტრალური ხაზის გასწვრივ ჩამოყალიბდეს მიმართულების დიაგრამა.



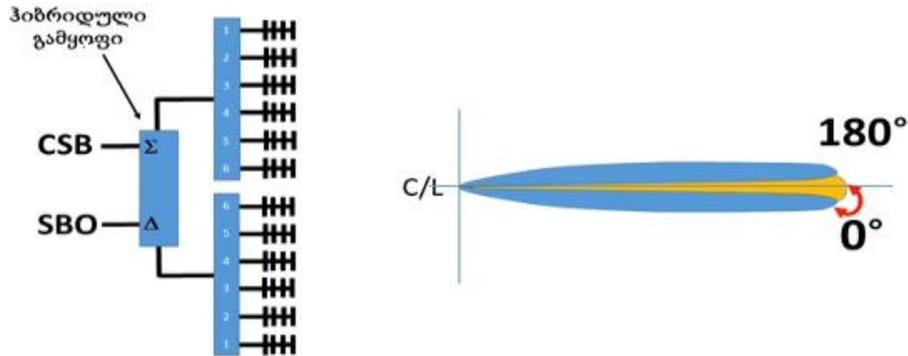
ნახ. 2.5.2.1 ანტენათა მასივიდან გამოსხივებული გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით (CSB) [17]

SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალში 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები არ არიან ფაზაში, რაც ცენტრალური ხაზის მარჯვნივ და მარცხნივ წარმოქმნის ორ მიმართულების დიაგრამას, ხოლო ცენტრალურ ხაზზე ფაზათა სხვაობის გამო სიგნალის სიმძლავრე პრაქტიკულად ნულდება [16,75,76].



ნახ. 2.5.2.2 სიგნალის მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO) მიმართულების დიაგრამა [17]

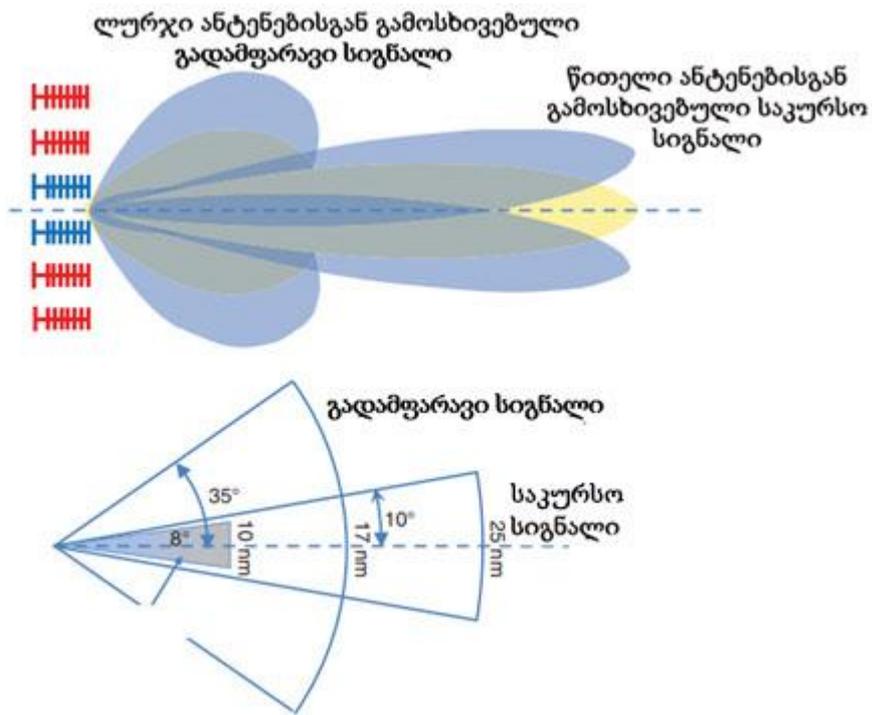
CSB სიგნალში 150 ჰც და 90 ჰც სიხშირის სიგნალები ერთმანეთის მიმართ არიან ფაზაში, ხოლო SBO სიგნალში ერთმანეთის მიმართ საპირისპირო ფაზაში ანუ 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სიგნალებს შორის არის 180 გრადუსიანი ფაზური სხვაობა. [75,76]



ნახ. 2.5.2.3 ყვითელი ფერი (CSB) სიგნალი ლურჯი ფერით (SBO) სიგნალი [17]

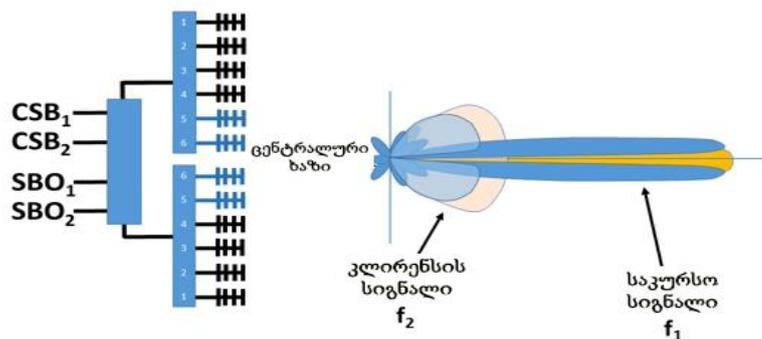
CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალის ამპლიტუდის შემცირება არ ახდენს გავლენას საკურსო სიგნალის ცენტრალური ხაზის მდებარეობაზე. ცენტრალური ხაზი განისაზღვრება მხოლოდ SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალის გადამცემი ანტენების მიმართულების დიაგრამის სიმეტრიით. პრაქტიკაში, ანტენებს ყოველთვის ახლავს დაბალი დონის ყალბი გვერდითი გამოსხივებები, რომლებიც, როგორც წესი, 15 დბ-ით ნაკლებია მთავარ სიგნალზე. თუმცა, არსებობს თვითმფრინავის მიერ ცრუ კურსის აღების შესაძლებლობა, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, თუ გვერდითი ყალბი გამოსხივება ძირითადად CSB სიგნალისგან მოდის [4, 17,75,76].

ცრუ კურსის თავიდან ასაცილებლად, დამატებითი ორი სიგნალი გამოსხივდება საკურსო რადიოშუქურის ორი ან სამი ანტენის გამოყენებით ცენტრალური ხაზის ორივე მხარეს. შედეგად ვიღებთ უფრო ფართო CSB და SBO მიმართულების დიაგრამებს, სადაც გამოსხივების სიმძლავრე 10 დბ-ით ნაკლებია ძირითად საკურსო სიგნალთან შედარებით. ამ გზით, გვერდითი ყალბი სიგნალები გადაიფარება. ამ დამატებით გადამცემს ეწოდება გადამფარავი სიგნალი, ხოლო ძირითად გამოსხივებას ეწოდება საკურსო სიგნალები [16, 17].



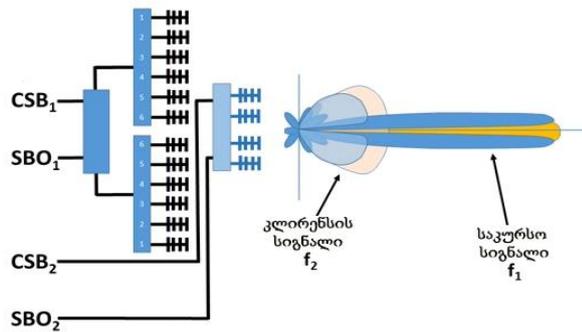
ნახ. 2.5.2.4 გადამფარავი და საკურსო სიგნალების გამოსხივება [50]

თანამედროვე საკურსო რადიომუქურები გადამფარავი სიგნალისთვის იყენებენ ცალკე რადიოსიხშირეებს. ნახაზზე საკურსო სიგნალი f_1 -ით და გადამფარავი სიგნალი f_2 -ით არის ნაჩვენები f_1 და f_2 , როგორც წესი, გამოყოფილია დაახლოებით 8 კჰც-ით, ასეთ სისტემებს უწოდებენ ორ სიხშირიან საკურსო რადიომუქურას [17, 75, 76].



ნახ. 2.5.2.5 ორსიხშირიანი საკურსო რადიომუქურა [17]

ასევე, არსებობს სრულიად დამოუკიდებელი ანტენათა მასივის გამოყენების შესაძლებლობა, სადაც 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ერთი და იმავე წყაროებიდან მოდის, როგორც კურსის სიგნალის, ასევე გადამფარავი სიგნალის გადამცემებისთვის.



ნახ. 2.7.6 ორსიხშირიანი საკურსო რადიოშუქურა [17]

როდესაც საჰაერო ხომალდი მდებარეობს ა.დ.ზ-ის ცენტრალურ ხაზზე, საკურსო სიგნალი ძლიერად გამოიხატება და მას აფიქსირებს ILS-LOC რადიომიმღების დეტექტორი. შედეგად, კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი (CDI) იმართება საკურსო სიგნალის მიხედვით, რადგან გადამფარავი სიგნალი დაახლოებით 10 დბ-ით სუსტია. სიტუაცია საპირისპიროა იმ შემთხვევაში, როდესაც თვითმფრინავი ხვდება გადამფარავი სიგნალის ზონაში. ამ დროს საკურსო სიგნალი მნიშვნელოვნად სუსტდება, ხოლო მიმღების მიერ დაფიქსირებული გადამფარავი სიგნალი იწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) შესაბამის რეაგირებას. [75]

2.6 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) პარამეტრების ნორმები ICAO-ს მიხედვით

საკურსო რადიოშუქურა (ILS-LOC) უნდა მუშაობდეს 108-111.975 მჰც სიხშირეთა ზოლში. დასაშვებია გადამტანი სიხშირის ნომინალური მნიშვნელობებიდან გადახრა არაუმეტეს $\pm 0,005\%$ -ით. საკურსო რადიოშუქურა უნდა ასხივებდეს ჰორიზონტალურად პოლარიზებულ ტალღებს. საჰაერო ხომალდის კურსის ხაზზე ყოფნის $\pm 20^\circ$ გვერდითი სხივებით, საკურსო რადიოშუქურის ანტენის მიერ გამოსხივებული ვერტიკალური შემადგენელი არ უნდა აღემატებოდეს $0,016\%$ -ს პირველი კატეგორიის საკურსო რადიოშუქურისათვის, $0,008\%$ -ს მეორე კატეგორიის შუქურისათვის და $0,005\%$ -ს მესამე კატეგორიის რადიოშუქურისათვის. [75,76]

მოქმედების ზონა: საკურსო რადიოშუქურამ უნდა უზრუნველყოს დამაკმაყოფილებელი მუშაობა იმ საჰაერო ხომალდისთვის, რომელიც იმყოფება დაფრენაზე შესვლის მიმართულებით საკურსო რადიოშუქურიდან 46 კმ მანძილზე $\pm 10^\circ$ სიგანის სექტორის ფარგლებში და 31,5 კმ მანძილზე $\pm 35^\circ$ სექტორის საზღვრებში.

ვერტიკალურ სიბრტყეში საკურსო რადიომუქურის სიგნალების მიღების შესაძლებლობა უზრუნველყოფილ უნდა იქნეს ჰორიზონტთან 7⁰-იანი კუთხის სექტორში 300 მეტრზე მეტ სიმაღლეზე დედამიწის ზედაპირზე იმ ყველაზე მაღალ წერტილთან შედარებით, რომელიც საკურსო რადიომუქურის მოქმედების ზონაში იმყოფება.[75,76]

კურსის სექტორის სიგანე: დადგენილია, რომ იმ წერტილებში, რომლებიც იმყოფება გლისადის კუთხით ჰორიზონტალური სიბრტყიდან 15 მ სიმაღლეზე, კურსის სექტორის სიგანე უნდა იყოს 210 მ.

ველის დამაბულობა: საკურსო რადიომუქურის მოქმედების ზონის საზღვრებში ველის დამაბულობა უნდა იყოს არანაკლებ 40 მიკროვოლტი მეტრზე. გლისადის ხაზის გასწვრივ, კურსის სექტორის საზღვრებში, 18,5 კმ მანძილზე და 60 მ სიმაღლეზე, ველის დამაბულობა I კატეგორიის სისტემებისთვის ასევე უნდა იყოს არანაკლებ 40 მიკროვოლტი მეტრზე. II კატეგორიის სისტემებისთვის მოთხოვნა იზრდება და ველის დამაბულობა უნდა იყოს არანაკლებ 200 მიკროვოლტი მეტრზე 15 მ სიმაღლეზე. III კატეგორიის სისტემებისთვის კი ველის დამაბულობა უნდა იყოს არანაკლებ 200 მიკროვოლტი მეტრზე 6 მ სიმაღლეზე [2, 4, 6, 9,75,76].

2.7 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღები

ILS-LOC-ის მიერ გამოსხივებული სანავიგაციო სიგნალი მიიღება საჰაერო ხომალდზე განთავსებული სანავიგაციო რადიომიმღების მიერ. საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) მიმღებები ხშირად კომბინირებულია რადიონავიგაციის სხვა სისტემებთან. ILS-LOC რადიომიმღები განლაგებულია საჰაერო ხომალდის რადიონაკვეთურში.



ნახ. 2.7.1 ILS-LOC-ის რადიომიმღები, რომელიც განთავსებულია საჰაერო ხომალდზე

საკურსო რადიოშუქურისთვის განსაზღვრულ სიხშირულ ზოლში (108.10- 111.95 მჰც) გამოყოფილია ორმოცი არხი 50 კჰც ინტერვალით, მხოლოდ იმ სიხშირეების გამოყენებით, სადაც მჰც-ის მეთაფეები კენტია. ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურისთვის (ILS-LOC) განსაზღვრულია შემდეგი 40 არხი [9,75,76]:

108.10, 108.15, 108.30, 108.35, 108.50, 108.55, 108.70, 108.75, 108.90, 108.95, 109.10, 109.15, 109.30, 109.35, 109.50, 109.55, 109.70, 109.75, 109.90, 109.95, 110.10, 110.15, 110.30, 110.35, 110.50, 110.55, 110.70, 110.75, 110.90, 110.95, 111.10, 111.15, 111.30, 111.35, 111.50, 111.55, 111.70, 111.75, 111.90, 111.95. [76]

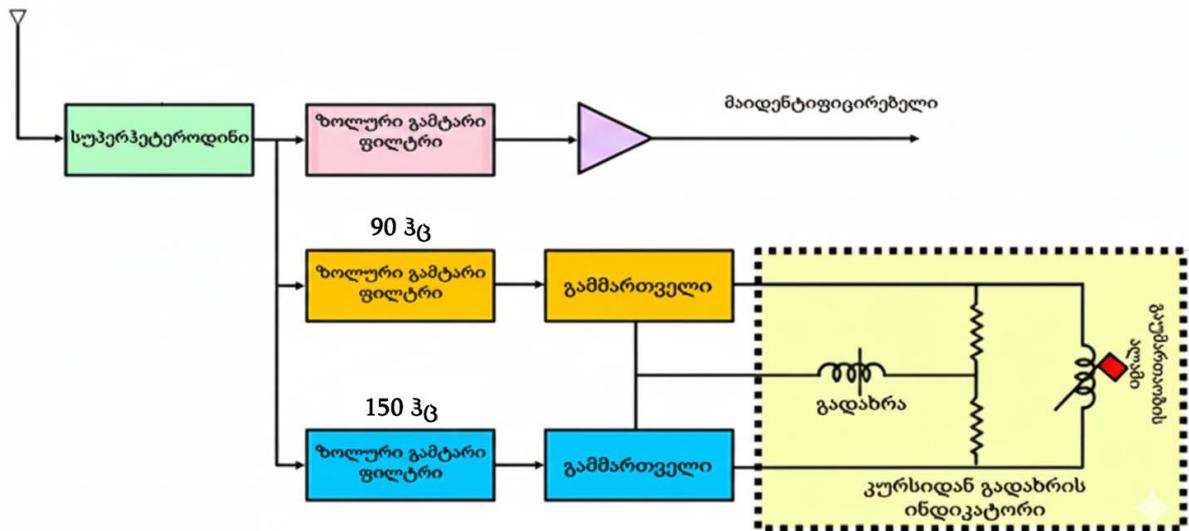
ხელსაწყოების მიხედვით დაფრენის სისტემის საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) მიმღებები დაფუძნებულია ჰეტეროდინის პრინციპზე, მართვის პანელიდან დისტანციური რეგულირებით.

საკურსო რადიოშუქურის სანავიგაციო სიგნალები მიღება ILS-LOC-ის რადიომიმღების ანტენაზე. [76]

მიღებული სიგნალი მოდულირებულია გადამტან სიხშირეზე 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალებით. გარდა სანავიგაციო ტონალური სიგნალებისა, მიმღებში შემოსული სიგნალი შეიცავს მაინდენტიფიცირებელ სიგნალს, რომელიც მოდულირებულია 1020 ჰც სიხშირეზე, რაც წარმოადგენს მორზეს კოდით გადაცემულ იდენტიფიკატორს და გამოიყენება მფრინავის მიერ კონკრეტული საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ამოსაცნობად.

რადიომიმღებში დემოდულატორი გამოყოფს სასარგებლო სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს (90 ჰც და 150 ჰც) გადამტანი სიხშირიდან. მიღებული სიგნალი შემდეგ მიეწოდება სამ ცალკეულ არხს, სადაც ხდება სანავიგაციო ტონალური სიგნალების განცალკევება ზოლოვანი ფილტრების საშუალებით. ერთი არხი მიეწოდება აუდიო გამაძლიერებელს, რომელიც გამოყოფს 1020 ჰც მაინდენტიფიცირებელ ტონს, ხოლო დანარჩენი ორი გადის 90 ჰც-ისა და 150 ჰც-ის ზოლოვან ფილტრებზე.

ამგვარად, მიღებული სიგნალი იყოფა ორ კომპონენტად 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებად, რომლებიც გარდაიქმნება შესაბამისი მნიშვნელობის მუდმივ დენად და მიეწოდება კურსიდან გადახრის მაჩვენებელს (CDI). დამატებით, გამოიყენება სამი ზოლოვანი ფილტრი 400 ჰც, 1300 ჰც და 3000 ჰც სიხშირეებზე კონკრეტული მომნიშვნელი რადიოშუქურების იდენტიფიცირების მიზნით [4, 66].



ნახ. 2.7.2 წარმოდგენილია სანავიგაციო რადიომიმღების გამართივებული ბლოკ-სქემა, რომელიც აღწერს სანავიგაციო რადიოსიგნალის დამუშავების პროცესს

რადიომიმღებში სიგნალის სტაბილურობის უზრუნველსაყოფად გამოიყენება ავტომატური გაძლიერების კონტროლი (AGC), რომლის მთავარი ფუნქციაა გამომავალი სიგნალის სიძლიერის სტაბილურობის შენარჩუნება. ეს კრიტიკულად მნიშვნელოვანია, რადგან 90 ჰც და 150 ჰც სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ერთნაირი პროპორციით უნდა გაძლიერდეს. მათი პროპორციული გაძლიერება უზრუნველყოფს მოდულაციის ინდექსთა შორის ზუსტი თანაფარდობის შენარჩუნებას, რაც აუცილებელია კურსის გადახრის ინდიკატორის (CDI) სწორ მუშაობასა და მთლიანად სანავიგაციო სისტემის საიმედო ფუნქციონირებისთვის [66].

საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღები ერთდროულად იღებს CSB და SBO სიგნალებს, რომლებიც მოდულირებულია 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალებით. საჭირო ხომალდის მდებარეობა ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით განისაზღვრება ამ სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობით, ანუ DDM მნიშვნელობით, რომლებიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით [17,75,76]:

$$DDM = \frac{U_{90\text{ჰც}} - U_{150\text{ჰც}}}{U_{90\text{ჰც}} + U_{150\text{ჰც}}}, \quad (2.7.1)$$

სადაც:

m_{90} - არის 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალის მოდულაციის ინდექსი,
 m_{150} - არის 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალის მოდულაციის
ინდექსი.

საჰაერო ხომალდს ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით მდებარეობის მიხედვით, DDM-ს შეიძლება ჰქონდეს დადებითი ან უარყოფითი მნიშვნელობები.

ა.დ.ზ-ის მარჯვენა მხარეს, რადგან 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ფაზაშია CSB და SBO სიგნალებში, 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი დომინირებს, რის შედეგადაც DDM იღებს დადებით მნიშვნელობას. როდესაც საჰაერო ხომალდი გადაკვეთს ა.დ.ზ-ის ცენტრალურ ხაზს და გადადის მარცხენა მხარეს, SBO-ს ფაზა იცვლება 180°-ით. შედეგად, 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ორივე სიგნალში (CSB და SBO) აღმოჩნდება ფაზაში. ამგვარად, 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი დომინირებს და DDM-ის მნიშვნელობები უარყოფითი ხდება.[75,76]

თუ საჰაერო ხომალდი ა.დ.ზ-ის ცენტრალური ხაზიდან დაახლოებით 40 გრადუსით არის დაშორებული, საკურსო რადიოშუქურის სიგნალი შეიძლება გამოუსადეგარი იყოს, ამიტომ კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე (CDI) გამოჩნდება გამაფრთხილებელი დროშა. როდესაც თვითმფრინავი ცენტრიდან 35 გრადუსს მიაღწევს, სისტემა მიიღებს მაიდენტიფიცირებელ სიგნალს მორზეს კოდის სახით და კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე (CDI) გამაფრთხილებელი ალამი შეიკვეცება. ამ მომენტში კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი იქნება ბოლომდე გადაწეული კონკრეტულ მხარეს, სანამ არ მიაღწევს ხუთ გრადუსიან სექტორს. კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) ისარი იწყებს მოძრაობას, როდესაც ხომალდი არის ხუთ გრადუსიან სექტორში და მოთავსდება ცენტრში მხოლოდ მაშინ, როდესაც თვითმფრინავი ცენტრალურ ხაზზე იქნება განთავსებული [17,75,76].

კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი (CDI)



ნახ. 2.7.3 საჰაერო ხომალდის გადახრა (გრადუსებში) ა.დ.ზ.-ის ცენტრალური ხაზიდან [17]

სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ICAO) დანართი 10, ტომი I-ის მიხედვით, საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღები უნდა უზრუნველყოფდეს საიმედო მუშაობას შემდეგი ე.მ. ხელშეშლის პირობების არსებობის შემთხვევაში:

თანაარხული ე.მ. ხელშეშლისას: სასურველი სიგნალი უნდა აღემატებოდეს არასასურველ თანაარხულ სიგნალს 20 დბ-ით ან მეტით;

მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლისას (50 კჰც-ით დაშორებული): არასასურველი სიგნალი, რომელიც მდებარეობს სასურველი სიგნალიდან 50 კჰც-ის დაშორებით, შეიძლება აღემატებოდეს სასურველ სიგნალს 34 დბ-მდე;

მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლისას (100 კჰც-ით დაშორებული): არასასურველი სიგნალი, რომელიც მდებარეობს სასურველი სიგნალიდან 100 კჰც-ის დაშორებით, შეიძლება აღემატებოდეს სასურველ სიგნალს 46 დბ-მდე;

არასასურველი სიგნალი, რომელიც მდებარეობს სასურველი სიგნალიდან 150 კჰც-ით ან უფრო დაშორებით, შეიძლება აღემატებოდეს სასურველ სიგნალს 50 დბ-მდე.[75,76]

ILS-LOC-ის სიგნალის დონე ცვალებადია მისთვის განსაზღვრულ სამუშაო ზონაში, რაც გამოწვეულია მანძილით, გეომეტრიითა და გარემო პირობებით. თუმცა, საბორტო სანავიგაციო მიმღებების ე.მ. ხელშეშლისადმი მდგრადობის შესწავლისას, რეკომენდაციების [6,7,9] თანახმად, საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო რადიომიმღების

ანტენაზე მიღებული ILS-LOC სიგნალი განიხილება მუდმივი, მინიმალური სასურველი დონით -89 დბ/მვ.

2.8 ელექტრომაგნიტური თავსებადობა სიხშირულად მოდულირებულ რადიო მაუწყებლობასა და საკურსო რადიოშუქურას შორის (ILS-LOC)

ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირი (ITU) უზრუნველყოფს სიხშირეთა სპექტრის გლობალურ მართვასა და რეგულირებას. ე.მ. ხელშეშლის შემცირების და რადიოკავშირების ჰარმონიზაციის მიზნით, ITU-მ მსოფლიო სამ სიხშირულ რეგიონად დაყო.

FM რადიომაუწყებლობისთვის განსაზღვრული სიხშირეები გამოქვეყნებულია რადიორეგულაციებში. სიხშირული ზოლისა და არხებს შორის განცალკევების კრიტერიუმები რეგიონების მიხედვით შემდეგია:

- პირველი რეგიონი (ევროპა, აფრიკა, ახლო აღმოსავლეთი და ყოფილი საბჭოთა კავშირის ქვეყნები): სიხშირული ზოლი გამოყოფილია 87.5 მჰც-დან 108 მჰც-მდე. არხებს შორის განცალკევება შეადგენს 100 კჰც-ს;
- მეორე რეგიონი (ამერიკა): სიხშირული ზოლი არის 88 მჰც-დან 108 მჰც-მდე. არხებს შორის დაშორება შეადგენს 200 კჰც-ს;
- მესამე რეგიონი (აზია, ოკეანეთი და ავსტრალია): სიხშირული ზოლი გამოყოფილია 87.5 მჰც-დან 108 მჰც-მდე. არხებს შორის განცალკევება შეადგენს 100 კჰც-ს.

რაც შეეხება პოლარიზაციას, FM სიგნალი შეიძლება პოლარიზებულ იქნეს როგორც ჰორიზონტალურად, ასევე ვერტიკალურად ან შერეულადაც [6].

ხმოვან FM რადიომაუწყებლობასა (87.5–108 მჰც) და რადიოსანავიგაციო სისტემებს (108.1–111.95 მჰც) შორის ე.მ. თავსებადობა განსაზღვრულია ITU-ს მიერ [4, 7,75,76].

ელექტრომაგნიტური თავსებადობის ძირითადი პარამეტრებია: ე.მ. ველის დაძაბულობა, სიხშირული დაშორება, რადიომიმღების მგრძობელობა, სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა, ინტერმოდულაციური პროდუქტების წარმოქმნის შესაძლებლობა, მანძილი სანავიგაციო რადიომიმღებსა და FM სამაუწყებლო გადამცემს შორის, სასურველი სიგნალის სიმძლავრე და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრე.

რადიოსანავიგაციო საშუალებების ელექტრომაგნიტური თავსებადობა გამოითვლება შემდეგი თანმიმდევრობით:

ეტაპი 1: უნდა განისაზღვროს ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში შემავალი სასურველი და არასასურველი სიგნალის დონე და სპექტრული განაწილება;

ეტაპი 2: უნდა განისაზღვროს არასასურველი სიგნალების მაქსიმალური დონე და სპექტრული განაწილება (ხმაურის ჩათვლით) კონკრეტულ ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე რადიომიმღების მუშაობის მოთხოვნების შესაბამისად;

ეტაპი 3: უნდა განისაზღვროს ინტერაქტიული ეფექტები სასურველ და არასასურველ სიგნალებს შორის სხვადასხვა სიხშირის განცალკევებისთვის, რადიომიმღების მუშაობის მოთხოვნების შესაბამისად (დანართი 10). ეს ეფექტები შეიძლება განისაზღვროს რეალური გაზომვების ან ანალიზის მეშვეობით;

ეტაპი 4: მიღებული მონაცემებიდან უნდა განისაზღვროს სიხშირის და მანძილის განცალკევების ხარისხი, რომელიც საჭიროა მომსახურების საჭირო დონის უზრუნველსაყოფად. ასევე უნდა დავრწმუნდეთ, რომ ე.მ. ხელშეშლა, რომელიც მოქმედებს კონკრეტულ სანავიგაციო რადიომიმღებზე, არ იწვევს სანავიგაციო გამოთვლების ცდომილებებს დასაშვებ მნიშვნელობაზე მეტად;

ეტაპი 5: სიხშირის განცალკევების მოთხოვნების დასადგენად აუცილებელია შესაბამისი სიგნალის გავრცელების მოდელის განსაზღვრა. ყველა შემთხვევაში, დაცვის მოთხოვნები უნდა შეფასდეს რადიომონიტორინგის გამოყენებით. ITU-R შესაბამის რეკომენდაციაში [55,75] აღწერილი პროცედურები საშუალებას იძლევა კონკრეტულ პირობებში შემუშავდეს სიხშირული და მანძილის განცალკევება იმ შემთხვევაში, როდესაც ე.მ. ხელშეშლის სიგნალი არ არის თანაარხული (Co-channel) სასურველ სიგნალთან [4, 55, 76].

მინიმალური ელექტრომაგნიტური ველის დამაბულობა, რომელიც დაცული უნდა იყოს საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) განსაზღვრულ სამუშაო ზონაში, შეადგენს 32 დბ (40 მკვ/მ). თუ საკურსო რადიოშუქურა უზრუნველყოფს დაფარვას საპირისპირო კურსით, მინიმალური ველის დამაბულობა რჩება იგივე, ანუ 32 დბ ICAO-ს დანართი 10 მოითხოვს ე.მ. ველის უფრო მაღალ დამაბულობას, საკურსო რადიოშუქურის მოქმედების ზონის გარკვეულ ნაწილში კონკრეტულად, ასაფრენ-

დასაფრენი ზოლის განსაზღვრული დაფრენის წერტილიდან 18,5 კმ (10 ნმ) მანძილამდე, მინიმალური ველის დაძაბულობა უნდა იყოს 39–46 დბ (89–200 მკვ/მ), შესაბამისი კატეგორიის (CAT-I, II, III) მიხედვით, რათა გაიზარდოს მიღებული სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა (SNR), რაც აუმჯობესებს სისტემის მთლიანობას [4, 6, 75, 76].

2.8.1 თავისუფალ სივრცეში სამაუწყებლო სიგნალის ე.მ. ველის დაძაბულობის გამოთვლა

თავისუფალ სივრცეში სამაუწყებლო სიგნალის ე.მ. ველის დაძაბულობა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით: [75,76]

$$E = 76.9 + P - 20 \log d + H + V, \quad (2.8.1.1)$$

სადაც:

E - არის სამაუწყებლო სიგნალის ე.მ. ველის დაძაბულობა (დბ(მკვ/მ));

P - სამაუწყებლო სადგურის მიერ მაქსიმალური ეფექტური გამოსხივებული სიმძლავრე (e.r.p.) (დბვ);

d - დახრილი მანძილი (კილომეტრებში);

H - ჰორიზონტალურად გამოსხივებული მიმართულების დიაგრამის (h.r.p.) კორექცია (დბ);

V - ვერტიკალურად გამოსხივებული მიმართულების დიაგრამის (v.r.p.) კორექცია (დბ).

2.8.2 საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში შემავალი სასურველი და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა

თუ დავუშვებთ, რომ საჰაერო ხომალდის ანტენის მიმართულების დიაგრამას არ აქვს მიმართულებითი მახასიათებელი, სამაუწყებლო სიგნალის და საკურსო რადიოშუქურის სიგნალის ველის დაძაბულობა უნდა გარდაიქმნას სიმძლავრეში ILS-LOC რადიომიმღების შესასვლელში შემდეგი ფორმულების მიხედვით:[75,76]

ა) FM სამაუწყებლო სიგნალისთვის 87.5-108.0 მჰც დიაპაზონში:

$$N = E - 118 - L_s - L(f) - L_a , \quad (2.8.2.1)$$

სადაც:

N - არის საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო მიმღების შესასვლელში სამაუწყებლო სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

E - FM სამაუწყებლო სიგნალის ველის დაძაბულობა (დბ(მკვ/მ));

L_s - სიგნალის გამყოფის შედეგად მიღებული დანაკარგი 3.5 (დბ);

$L(f)$ - ანტენათა სისტემის სიხშირეზე დამოკიდებული დანაკარგი FM სამაუწყებლო სიხშირეზე f (მკვ), რომელიც შეადგენს 1.2 დბ-ს ყოველ მკვ-ზე 108 მკვ-ის ქვემოთ;

L_a - ანტენის სისტემის ფიქსირებული დანაკარგი 9 (დბ)[75,76].

ბ) ავიაციისთვის განკუთვნილ სანავიგაციო სიგნალისთვის 108-118 მკვ სიხშირულ ზოლში:

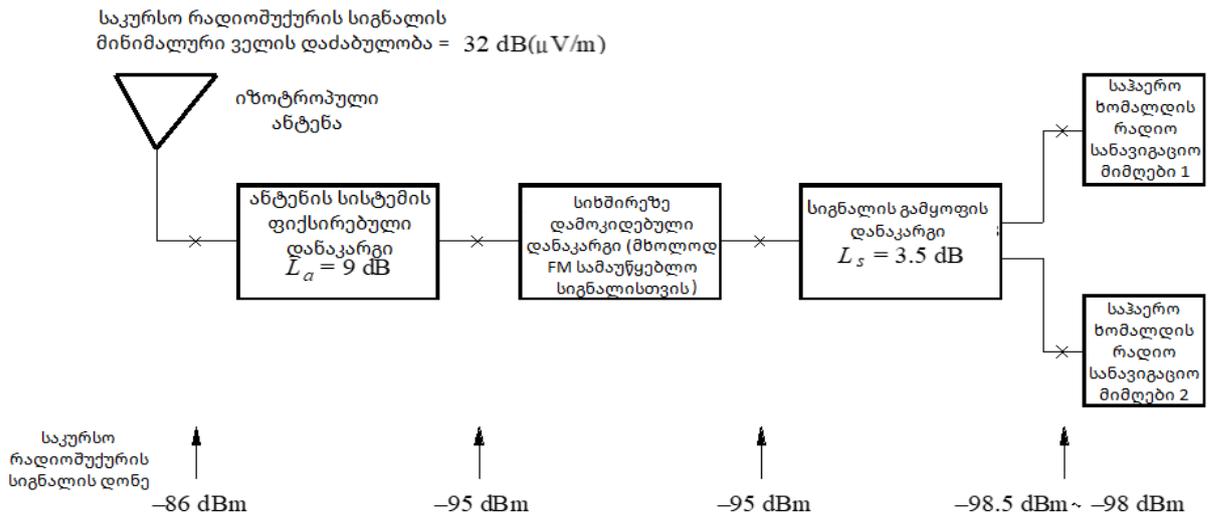
$$N_a = E_a - 118 - L_s - L_a , \quad (2.8.2.2)$$

სადაც:

N_a - არის საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო მიმღების შესასვლელში სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ),

E_a - სანავიგაციო სიგნალის ველის დაძაბულობა (დბ(მკვ/მ)).

ქვემოთ მოცემულ ნახაზზე წარმოდგენილია პროცესი, თუ როგორ გარდაიქმნება საკურსო რადიომუქურის სიგნალის მინიმალური ველის დაძაბულობა, რომლის მნიშვნელობაც არის 32 (დბ(მკვ/მ)), ფორმულის გამოყენებით -98 დბ/მვ-ად საჰაერო ხომალდის სანავიგაციო რადიომიმღების შესასვლელში [6, 8,75,76].



ნახ. 2.8.2.1 საკურსო რადიომუქურის მინიმალური ველის დაძაბულობის შემცირება [6]

ვინაიდან სადისერტაციო ნაშრომი ეხება აეროპორტის ზონაში FM მაუწყებლობიდან წარმოქმნილ ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედებას, ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე აღმოჩენილ და დადგენილ იქნა, რომ სანავიგაციო რადიომიმღების პირველ კასკადში ინტერმოდულაციური დამახინჯება აქტიურდება მაშინ, როდესაც მაღალი ამპლიტუდის მქონე გარე სიგნალები აქტიურ ელემენტებს არაწრფივი მუშაობის რეჟიმში გადაჰყავს. ეს არაწრფივობა იწვევს მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტების (IMD3) წარმოქმნას. მესამე რიგის კომპონენტები ხშირად ექცევა სასურველი სანავიგაციო სიგნალის სამუშაო სიხშირულ ზოლში (In-Band), მათი გაფილტვრა შეუძლებელი ხდება, რაც მიმღების მუშაობის კრიტიკულ დეგრადაციას იწვევს.

ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღების ე.მ. ხელშემშლის ზღვარი - არის ხელშემშლის სიგნალის მინიმალური სიმძლავრის დონე, რომელიც იწვევს რადიომიმღების მუშაობის დაუშვებელ დეგრადაციას. საკურსო რადიომუქურის მიმღების საფრენოსნო შემოწმებებისა და გაზომვების შედეგად აღმოჩნდა, რომ ხელშემშლის სიგნალის დონის 1-დან 3 დბ-მდე გაზრდა ხელშემშლის ზღვრის მიღმა გამოიწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე (CDI) უხეშ ცვლილებას ან გაუმართაობის აღმის გამოჩენას [6,75,76].

საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში ე.მ. ხელშემშლის ზღვარად განიხილება სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსთა შორის

სხვაობის მნიშვნელობა 0.093, რომელიც იწვევს 7,5 მიკრო ამპერით იმ დენის ძალის ცვლილებას, რომელიც ამოძრავებს კურსიდან გადახრის მაჩვენებელს ან იწვევს გაუმართაობის ალმის გამოჩენას [8, 9,75,76].

2.8.3 ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების შეფასების მოქმედი კრიტერიუმები საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებისთვის

ILS-LOC რადიომიმღებებში მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებით (IMD3) გამოწვეული ე.მ. ხელშეშლის შეფასების მიზნით, შემდეგი ფორმულები გამოყენებულია პოტენციური ე.მ. შეუთავსებლობის შესაფასებლად [6]:

ა) ორი სიგნალის შემთხვევაში

$$2 \left\{ N_1 - 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f_1)}{0.4} \right\} + N_2 - 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f_2)}{0.4} + K - L_c + S > 0, \quad (2.8.3.1)$$

ბ) სამი სიგნალის შემთხვევაში

$$N_1 - 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f_1)}{0.4} + N_2 - 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f_2)}{0.4} + N_3 - 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f_3)}{0.4} + K + 6 - L_c + S > 0, \quad (2.8.3.2)$$

სადაც:

N_1, N_2 და N_3 - არის სამაუწყებლო სიგნალის სიმძლავრეები (დბ/მვ) სანავიგაციო მიმღების შესასვლელში სამაუწყებლო სიხშირეებისთვის f_1 და f_2 ;

f_1, f_2 - სამაუწყებლო სიხშირეები (მჰც) $f_1 > f_2$;

$K = 78$ - განსაზღვრულია საკურსო რადიოშუქურისთვის;

L_c - კორექტირების კოეფიციენტი (დბ) სასურველი სიგნალის სიმძლავრეზე ცვლილებების გათვალისწინებით.

S - 3 დბ-იანი ზღვარი იმ ფაქტის გათვალისწინებით, რომ ICAO-ს დანართი 10-ის 1998 წლის მიმღების იმუნიტეტის კრიტერიუმების განტოლებები არ იძლევა თავსებადობის შეფასების გარანტირებულ შედეგებს. [75,76]

ფორმულების (2.8.3.1) და (2.8.3.2) გამოყენებამდე, თითოეული სიგნალისთვის აუცილებელია კორექტირების მნიშვნელობის გათვალისწინება ცხრილ 2.8.3.1-ის მიხედვით კორექტირებული სიგნალის სიმძლავრე გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$N(\text{კორექტირებული}) = N - \text{კორექტირების მნიშვნელობა}$$

მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებით გამოწვეული ე.მ. ხელშეშლა (B1 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა) არ განიხილება იმ შემთხვევაში, თუ სიხშირული სხვაობა აღემატება 150 კჰც-ს; ასეთ შემთხვევებში, სიგნალის დონეები იმდენად მაღალი იქნებოდა, რომ მოხდებოდა ILS-LOC რადიომიმღების მგრძობელობის დაქვეითება (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა).[75,76]

ცხრილი 2.8.3.1 კორექტირების მნიშვნელობები სიხშირული განცალკევების მიხედვით

სასურველ სიგნალსა და ინტერმოდულაციურ პროდუქტს შორის სიხშირული სხვაობა (კჰც)	კორექტირების მნიშვნელობა (დბ)
0	0
50	2
100	5
150	11

კორექტირების ფაქტორი, რომელიც ითვალისწინებს სასურველი სიგნალის სიმძლავრის ცვლილების გავლენას მიმღების მდგრადობაზე, გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$L_c = N_A - N_{ref}, \quad (2.8.3.4)$$

სადაც:

L_c - კორექტირების ფაქტორია (დბ) სასურველი სიგნალის ცვლილების გასათვალისწინებლად;

N_A - ILS-LOC რადიომიმღებზე სასურველი სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

N_{ref} - ILS-LOC რადიომიმღებზე სასურველი სიგნალის საცნობარო (ფორმულისთვის განსაზღვრული) სიმძლავრის დონე (დბ/მვ), რომელიც არის -89 დბ/მვ. [75,76]

მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშემშლის ზღვრული და გამააქტიურებელი მნიშვნელობები:

ზღვრული მნიშვნელობა (Cut-off value): ეს არის FM რადიომამუწყებლობის სიგნალის მინიმალური სიმძლავრის დონე (დბ/მვ), რომელიც უნდა მიეწოდოს სანავიგაციო მიმღებს, რათა განხილულ იქნეს მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშემშლის (B1 ტიპის ე.მ. ხელშემშლა) პოტენციურ წყაროდ და გამოითვლება ფორმულით:[75,76]

$$\text{Cut-off value} = -66 + 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f)}{0.4} \text{ დბ/მვ}, \quad (2.8.3.5)$$

გამააქტიურებელი მნიშვნელობა (Trigger value): ეს არის FM გადაცემის სიგნალის მინიმალური სიმძლავრის დონე, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს მესამე რიგის ინტერმოდულაციის პროდუქტის წარმოქმნა, რაც პოტენციურ ხელშემშლად ითვლება. გამოითვლება ფორმულით:[75,76]

$$\text{Trigger value} = \frac{L_c - K - S}{3} + 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f)}{0.4} \text{ დბ/მვ}, \quad (2.8.3.6)$$

სადაც:

L_c - არის კორექტირების ფაქტორი (დბ);

K - არის 78 დბ-ს ტოლი მუდმივა ILS-LOC-თვის ორი სიგნალის ზემოქმედების შემთხვევაში;

f - სამამუწყებლო სიგნალი (მჰც);

S -3 დბ-იანი ზღვარი, რომელიც ითვალისწინებს ICAO-ს დანართ 10-ის (1998) მიმღების იმუნიტეტის კრიტერიუმების შეზღუდვებს, რაც არ უზრუნველყოფს თავსებადობის სრულ შეფასებას.[75,76]

ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედების შესაფასებლად, რომლებიც იწვევენ მიმღების მგრძობელობის დაქვეითებას (B2 ტიპის ე.მ. ხელშემშლა), გამოიყენება ემპირიული ფორმულა. ეს ფორმულა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სამამუწყებლო სიგნალის

მაქსიმალური დასაშვები დონე (დბ/მვ) ILS-LOC რადიომიმღების შესასვლელში, რათა თავიდან იქნეს აცილებული პოტენციური ხელშეშლა:[75,76]

$$N_{max} = \min \left(15; -10 + 20 \log \frac{\max(0.4; 108.1 - f)}{0.4} + L_c - S \right) , \quad (2.8.3.7)$$

სადაც:

N_{max} - არის სამაუწყებლო სიგნალის მაქსიმალური დონე (დბ/მვ) ILS-LOC რადიომიმღების შესასვლელში.

f - სამაუწყებლო სიგნალის სიხშირე (მჰც).

S - 3 დბ-იანი ზღვარი, რომელიც ითვალისწინებს ICAO-ს დანართ 10-ის (1998) მიმღების იმუნიტეტის კრიტერიუმების შეზღუდვებს, რაც არ უზრუნველყოფს თავსებადობის სრულ შეფასებას.

L_c - კორექტირების ფაქტორი (დბ), რომელიც ითვალისწინებს სასურველი სიგნალის დონის ცვლილებას. გამოითვლება ფორმულით:

$$L_c = \max(0; 0.5(N_A - N_{ref})), \quad (2.8.3.8)$$

სადაც:

N_A - არის სასურველი სიგნალის დონე (დბ/მვ) საჰაერო მიმღების შესასვლელში.

N_{ref} - არის სასურველი სიგნალის საცნობარო დონე (დბ/მვ).

თავსებადობის შეფასების უფრო დეტალური ანალიზისთვის, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მეთოდი, რომელიც აღწერილია ITU-R SM.337 რეკომენდაციაში სიხშირისა და მანძილის განცალკევების შესახებ [4, 6, 55].

სასურველი სიგნალის დაცვა შესაძლებელია ორი მეთოდით: პირველი მეთოდი გულისხმობს რადიომიმღების ანტენაზე როგორც სასურველი, ისე არასასურველი სიგნალის ველის ინტენსივობის გაანგარიშებას სასურველ გადამცემამდე მანძილის გათვალისწინებით დადგენილი სასურველი და არასასურველი სიგნალების (D/U) თანაფარდობის საფუძველზე, არასასურველი ხელშეშმული სიგნალის მაქსიმალური დონე განსაზღვრავს ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრულ მნიშვნელობას,

რომლის მიღწევის შემდეგაც ხელშეშლა დამაზიანებელი ხდება. ეს მნიშვნელობა მოცემულია შემდეგი ფორმულით [4,75,76]:

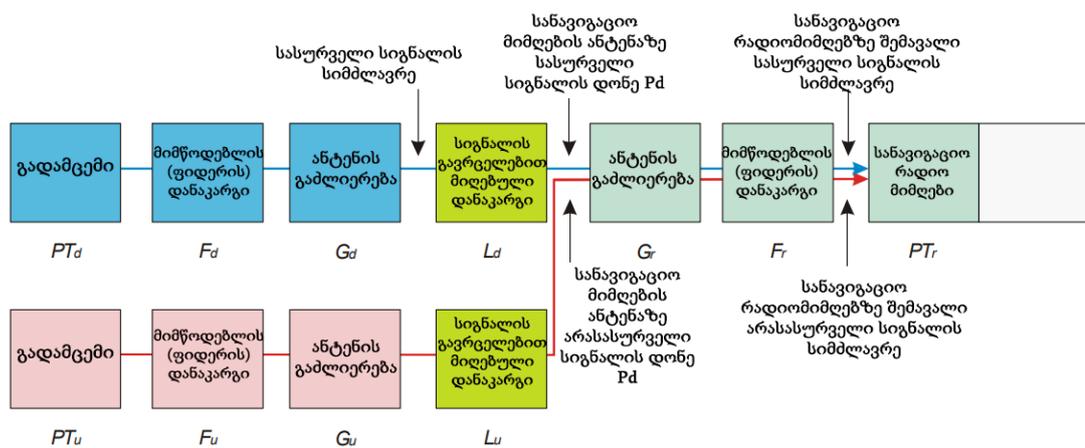
$$P_d - P_u = \frac{D}{U}, \quad (2.8.3.9)$$

სადაც:

P_u - სანავიგაციო რადიომიმღებზე არასასურველი სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

P_d - სანავიგაციო რადიომიმღებზე სასურველი სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

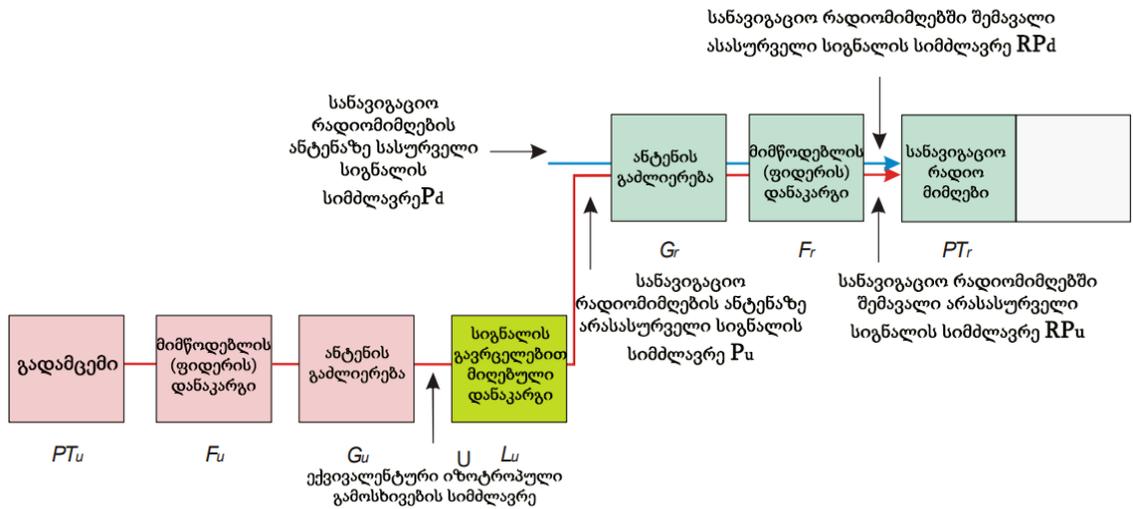
$\frac{D}{U}$ - დაცვის თანაფარდობა, როგორც დადგენილია გაზომვებით და მოცემულია დანართ 10-ში. თუ თავსებადობის ანალიზის მიზანია სიხშირულად მოდულირებულ (FM) რადიოსერვისსა და საკურსო რადიომუქურას (ILS-LOC) შორის თავსებადობის განსაზღვრა, მაშინ უსაფრთხოების ზღვარი 6-10 დბ უნდა დაემატოს საჭირო D/U თანაფარდობას.[75,76]



ნახ. 2.8.3.1 სიგნალების თავსებადობის მოდელში გამოყენებული ცვლადების აღწერა, სადაც მოცემულია სასურველი და არასასურველი სიგნალების მიღება რადიოსანავიგაციო მიმღების მიერ [71]

მეორე პრინციპი იყენებს ILS-LOC რადიომიმღების ანტენაზე ველის მინიმალურ დამაბულობას, როგორც ეს განსაზღვრულია ICAO-ს მიერ ყველა საკომუნიკაციო და სანავიგაციო სისტემისთვის. ველის ეს მინიმალური დამაბულობა უნდა იყოს უზრუნველყოფილი ობიექტის განსაზღვრულ სამუშაო დაფარვის ზონაში. პირველი პრინციპის მსგავსად, დადგენილი სასურველი და არასასურველი სიგნალების თანაფარდობის (D/U) საფუძველზე შესაძლებელია განისაზღვროს არასასურველი

ხელშემშლის სიგნალის მაქსიმალური დონე, რომლის მიღწევამდეც ელექტრომაგნიტური ხელშემშლა არ არის დამაზიანებელი. ეს მიდგომა უფრო მიზანშეწონილია დაცვის უზრუნველსაყოფად განსაზღვრულ სამუშაო არეალში, ვიდრე პირველი პრინციპი [4, 75, 76].



ნახ. 2.8.3.2 რადიოკავშირის სისტემის კომპონენტები, რომლებიც აჩვენებენ მინიმალური სიგნალის გავრცელების მოდელს გადამცემიდან მიმღებამდე [71]

იმ შემთხვევებში, როდესაც სასურველ და არასასურველ სიგნალს შორის ურთიერთქმედება სათანადოდ არ არის დადგენილი (მაგალითად, რეალური გაზომვების საშუალებით), სასურველი (სანავიგაციო) სიგნალის დაცვა უნდა ეფუძნებოდეს ფაქტს, რომ არასასურველი სიგნალი გაცილებით დაბალია (6 – 10 დბ) ILS-LOC რადიომიმღების ხმაურის სიმძლავრე [4, 71,75,76].

2.8.4 სასურველი და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა ILS-LOC-ის რადიომიმღების ანტენაზე

ILS-LOC რადიომიმღების ანტენაზე მიღებული სიმძლავრე გამოითვლება გადამცემის სიმძლავრის, ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტისა და მიმწოდებლის (feeder) დანაკარგების შეჯამებით, შემდეგი ფორმულის მიხედვით [4, 71,76]:

$$P_d = PT_d - F_d + G_d - L_d , \tag{2.8.4.1}$$

სადაც:

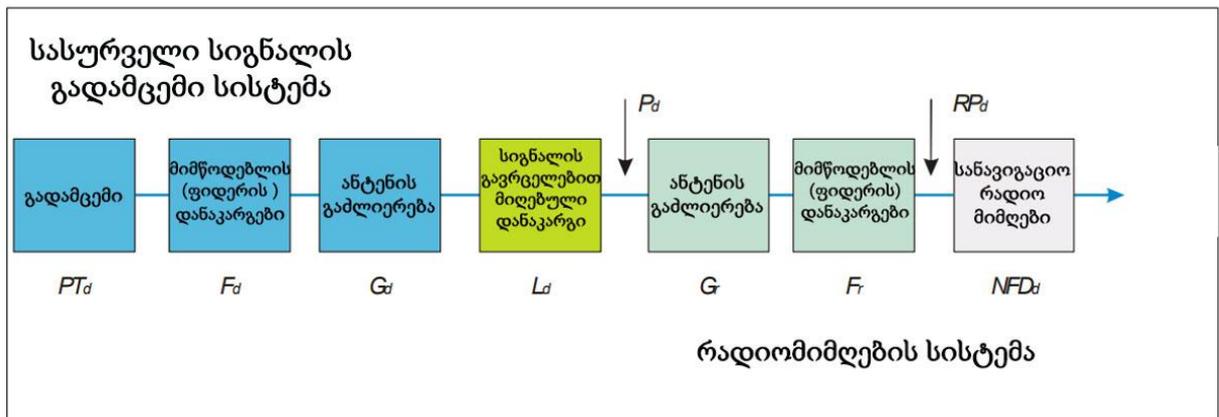
- PT_d - არის სასურველი გადამცემიდან გამოსხივებული სიმძლავრე (დბ/მვ);
- F_d - სასურველი გადამცემის მიმწოდებლის (feeder) დანაკარგი (დბ);
- G_d - სასურველი გადამცემის ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი (დბ/მვ);
- L_d - სასურველი სიგნალის გავრცელებისას მიღებული დანაკარგი (დბ);
- L_d - სასურველი სიგნალის სიმძლავრე სანავიგაციო რადიომიმღების ანტენაზე (დბ/მვ).

გავრცელებისას მიღებული დანაკარგი L_d გამოითვლება შემდეგი ფორმულის მიხედვით:

$$L_{bf} = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}, \quad (2.8.4.2)$$

სადაც:

- L_{bf} - არის ძირითადი დანაკარგები თავისუფალ სივრცეში გადამცემის დროს (დბ);
- d - მანძილი;
- λ - ტალღის სიგრძე.



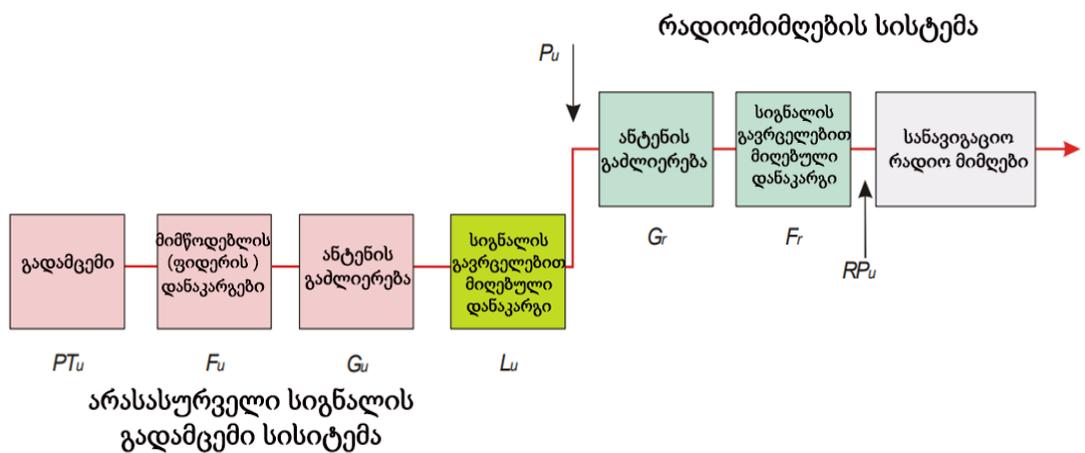
ნახ. 2.8.4.1 სანავიგაციო რადიომიმღების ანტენამდე სასურველი სიგნალის მიღების სქემატური დიაგრამა [71]

არასასურველი სიგნალის მიღებული სიმძლავრე ILS-LOC რადიომიმღების ანტენის შესასვლელში შესაძლებელია გამოითვალოს სხვადასხვა გადამცემის სიმძლავრის, ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტისა და მიმწოდებლის (feeder) დანაკარგების შეჯამებით, შემდეგი ფორმულის მიხედვით: [75,76]

$$P_u = PT_u - F_u + G_u - L_u, \quad (2.8.4.3)$$

სადაც:

F_u - არის არასასურველი გადამცემის მიმწოდებლის (feeder) დანაკარგი (დბ);
 G_u - არასასურველი გადამცემის ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი (დბი);
 L_u - არასასურველი სიგნალის გავრცელებისას მიღებული დანაკარგი (დბ);
 PT_u - არასასურველი გადამცემიდან გამოსხივებული სიმძლავრე (დბ/მვ);
 P_u - არასასურველი სიგნალის სიმძლავრე რადიომიმღების იზოტროპული ანტენაზე (დბ/მვ).[75,76]



ნახ. 2.8.4.2 სანავიგაციო რადიომიმღებზე არასასურველი სიგნალის მიღების სქემატური დიაგრამა [71]

ILS-LOC რადიომიმღების ანტენაზე სასურველი სიგნალისა და არასასურველი სიგნალების დონის გამოთვლის (ან შესაბამისი ICAO სტანდარტული მნიშვნელობის გამოყენების) შემდეგ, ამ სიგნალების დონეები, სასურველი სიგნალის არასასურველი სიგნალებით გამოწვეული მავნე ე.მ. ხელშემშლისგან დასაცავად უნდა შეესაბამებოდეს შემდეგ ფორმულას [4, 71, 75, 76]:

$$P_d - P_u = \frac{D}{U} , \tag{2.8.4.4}$$

სადაც:

P_u - არის ILS-LOC რადიომიმღებზე არასასურველი სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

P_d - ILS-LOC რადიომიმღებზე სასურველი სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ);

$\frac{D}{U}$ - დაცვის თანაფარდობა, რომელიც მოცემულია მეათე დანართში.

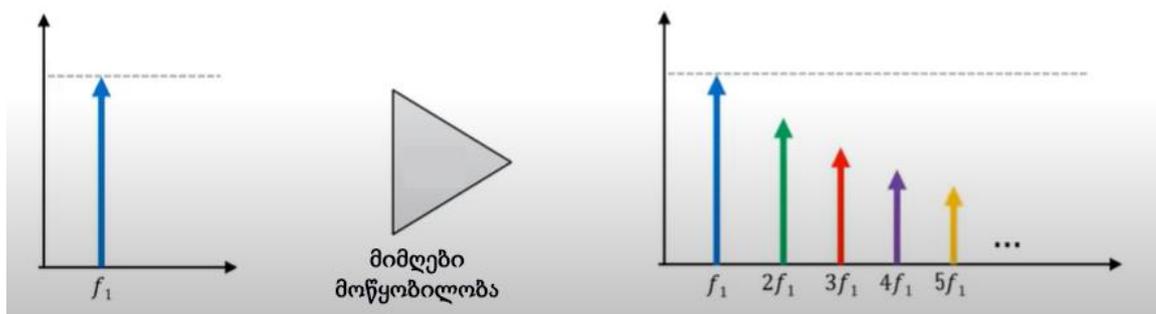
თუ თავსებადობის ანალიზი ეხება საავიაციო სისტემისა და არასავიაციო სისტემის თავსებადობის განსაზღვრას, მაშინ საჭიროა დაცვითი ნიშნული დაემატოს 6–10 დბ-ით.[75,76]

2.9 ინტერმოდულაციური დამახინჯების წარმოქმნა ILS-LOC-ის რადიომიმღებში

უსადენო კომუნიკაციის სისტემების სწრაფი განვითარება მოითხოვს რთულ ინფრასტრუქტურას, რომელიც ფუნქციონირებს გადატვირთულ სიხშირულ სპექტრში. ასეთ გარემოში მაღალი სიმძლავრის სიგნალებისა და მგრძობიარე მიმღებების ერთობლიობა ზრდის არასასურველი ზემოქმედების სიგნალებით გამოწვეული ხელშეშლის რისკს, რაც ართულებს სანავიგაციო სისტემების მუშაობას [6, 25,75,76].

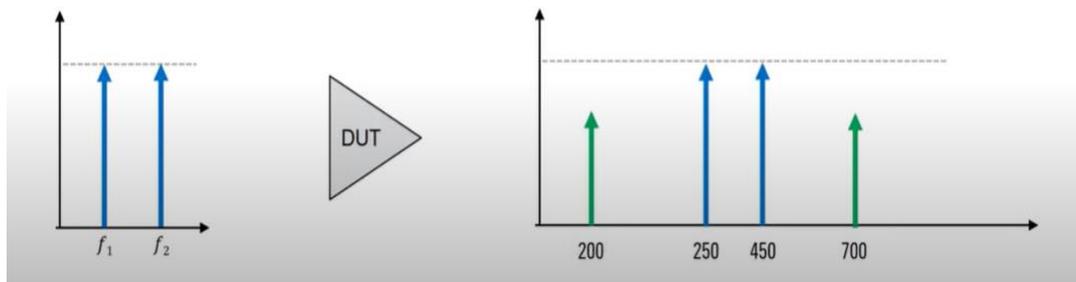
ეს ზემოქმედება წარმოიქმნება არაწრფივ სისტემაში, სადაც ორი ან მეტი განსხვავებული სიხშირის შემავალი სიგნალი შერეულია და წარმოქმნის ინტერმოდულაციურ დამახინჯებას (IMD). ამ დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი ინტერმოდულაციური პროდუქტები ქმნის სიხშირის კომპონენტების ფართო სპექტრს, რომელიც მოიცავს სამოქმედო სიხშირეებს (in band), ძირითად ტონებსა და ჰარმონიკებს. [6,25,75,76]

სიგნალს ყოველთვის ახლავს ჰარმონიკები, რაც უფრო იზრდება მათი რიგითობა, მით უფრო მცირდება მათი ამპლიტუდა (სიმძლავრე) [30,75,76].



ნახ. 2.9.1 ჰარმონიკული სიგნალების რიგითობა [11]

ჰარმონიკების გარდა, არსებობს ინტერმოდულაცია, რომელიც განსხვავდება იმით, რომ ერთი ძირითადი სიგნალის ქონის შემთხვევაში, მას ახლავს ჰარმონიკები. ხოლო, ერთზე მეტი ძირითადი სიგნალის შემთხვევაში, მიიღება ინტერმოდულაციის პროდუქტი. ეს პროდუქტები, როგორც წესი, წარმოადგენს ამ ძირითადი სიგნალების ჯამს და სხვაობას. მაგალითად, 250 მჰც და 450 მჰც სიხშირის მქონე ორი ძირითადი სიგნალის შემთხვევაში, მეორე რიგის ინტერმოდულირებული სიგნალი იქნება 700 მჰც და 200 მჰც [4,75,76].



ნახ.2.9.2 ინტერმოდულაციური სიგნალები [11]

ინტერმოდულაციურმა პროდუქტებმა თავადაც შეიძლება წარმოქმნას მეორეული ინტერმოდულაციური პროდუქტები.

ამპლიტუდის თვალსაზრისით, რაც უფრო მაღალია ინტერმოდულაციური კომპონენტის რიგითობა, მით უფრო მცირდება მისი ამპლიტუდა. თუმცა, რიგითობის მატებასთან ერთად, ინტერმოდულაციური კომპონენტები უფრო ფართო სიხშირულ ზოლს იკავებენ [4,75,76].

ინტერმოდულაციის უმეტესი ნაწილი ხდება მიმღების პირველ კასკადში. ზოგადი განტოლება ინტერმოდულაციის პროდუქტისთვის არის [11, 12, 30,75,76]:

$$IM = n_1A \pm n_2B \pm n_3C \pm \dots , \tag{2.9.1}$$

სადაც:

A, B, C და ა.შ. არის ორიგინალი სიხშირეები,

n_1, n_2, n_3 არის მთელი რიცხვები, რომლებიც განსაზღვრავენ პროდუქტის ჰარმონიკულ კომპონენტებს. ყველაზე დიდი გავლენა აქვს მე-3 და მე-5 რიგის ინტერმოდულაციურ პროდუქტებს [29,75,76].

მაღალი რიგის ინტერმოდულაციურ პროდუქტებს აქვთ დაბალი სიმძლავრის დონე. მესამე და მეხუთე რიგის პროდუქტებთან შედარებით ჰარმონიკული პროდუქტები, იშლება ფილტრებით, თუმცა, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური (IM3) პროდუქტები ახლოსაა ძირითად ტონებთან, რის გამოც ფილტრის გამოყენება არ არის ეფექტური. ინტერმოდულაცია შეიძლება წარმოიქმნას, როგორც სისტემის შიგნით, ასევე გარე წყაროებიდან.[75,76]

ინტერმოდულაციით გამოწვეული ხელშეშლის რისკი იზრდება, როდესაც სიხშირული სპექტრი გადატვირთულია და სიგნალის სიმძლავრე მაღალია. ასეთ პირობებში ინტერმოდულაციური პროდუქტები შესაძლოა დაემთხვეს სხვა სისტემის სამუშაო სიხშირულ დიაპაზონს. პრობლემა განსაკუთრებით მწვავედ ვლინდება ფართოზოლოვანი სიგნალებისთვის, რადგან ინტერმოდულაციური პროდუქტების სიხშირული დიაპაზონი პროპორციულია მათი რიგის. მაგალითად, მეხუთე რიგის (IM5) პროდუქტს აქვს დიაპაზონი, რომელიც ხუთჯერ აღემატება გადამტანი სიგნალის გამტარუნარიანობას [11, 12,75,76].

არაწრფივი სისტემების ერთ-ერთ ძირითად თვისებას წარმოადგენს ჰარმონიკული და ინტერმოდულაციური კომპონენტების წარმოქმნა. კერძოდ, თუ არაწრფივ სისტემაში შეყვანილი სიგნალი ერთ სიხშირულ კომპონენტს შეიცავს და მისი სიხშირეა f_a , მაშინ გამომავალ სიგნალში წარმოდგენილი იქნება როგორც ძირითადი კომპონენტი f_a , ასევე მისი ჰარმონიკები $2f_a, 3f_a, 4f_a, \dots$. იმ შემთხვევაში, როდესაც არაწრფივ სისტემაში ერთდროულად შეყვანილია ორი ან მეტი სიხშირული კომპონენტი (f_a, f_b, f_c), წარმოიქმნება ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რომლებიც გამოისახება ამ სიხშირეების სხვადასხვა წრფივი კომბინაციებით, რაც შეიძლება ზოგადი სახით ჩაიწეროს შესაბამისი მათემატიკური ფორმულით [12,75,76]:

$$x(t) = M_a \sin(2\pi f_a t + \varphi_a) + M_b \sin(2\pi f_b t + \varphi_b) + M_c \sin(2\pi f_c t + \varphi_c) , \quad (2.9.2)$$

სადაც:

$M_a M_b$ და M_c - არიან ამპლიტუდები თითოეული კომპონენტისთვის, რომლებიც განსაზღვრავენ სიგნალის სიმძლავრეს;

f_a, f_b და f_c - არიან სიგნალების სიხშირეები, თითოეულ კომპონენტს თავისი უნიკალური სიხშირე აქვს;

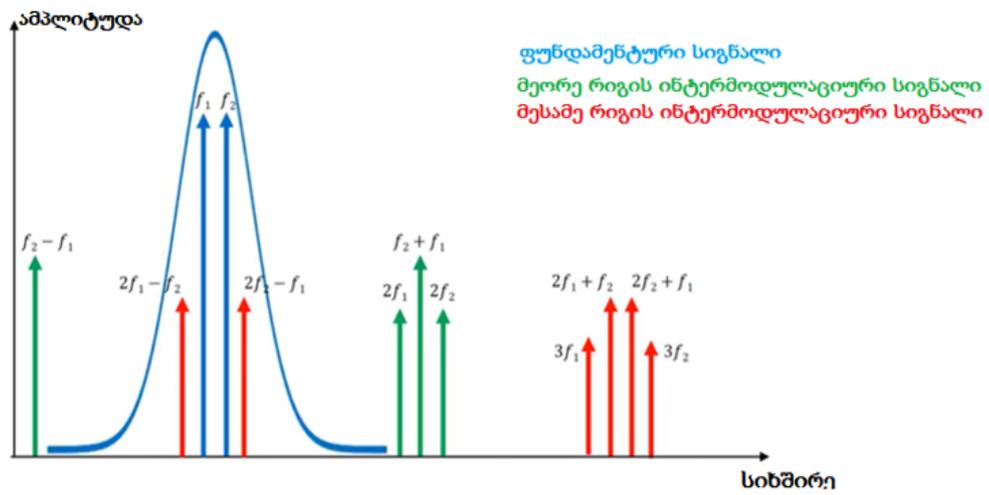
φ_a, φ_b და φ_c - არიან ფაზური კუთხეები, რომლებიც განსაზღვრავენ თუ სად იწყება თითოეული სიგნალი დროში.[75,76]

ინტერმოდულაციური პროდუქტის რიგითობა O , განისაზღვრება კოეფიციენტების აბსოლუტური მნიშვნელობების ჯამის მიხედვით:

$$O = |k_a| + |k_b| + \dots + |k_N| , \quad (2.9.3)$$

ფორმულა აჩვენებს, როგორ განისაზღვრება ინტერმოდულაციური პროდუქტის რიგითობა O , რაც არის კოეფიციენტების k_a, k_b და k_N -ის აბსოლუტური მნიშვნელობების ჯამი. [75,76]

ყველაზე სახიფათოა მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რადგან მათი სიხშირეები ($2f_1 - f_2$ და $2f_2 - f_1$) ფუნდამენტურ ტონებთან ახლოს მდებარეობს, რაც ართულებს მათ ფილტრაციას და ხელს უშლის სასურველ სიგნალს. ჰარმონიკების უმეტესობა ფილტრის დიაპაზონის მიღმაა და მარტივად იშლება, თუმცა მესამე რიგის პროდუქტები მაღალი ამპლიტუდით გამოირჩევა და არაწრფივი სისტემების შესწავლისას ძირითად პრობლემას წარმოადგენს. მესამე რიგის ინტერმოდულაციურმა სიგნალებმა შეიძლება შეაღწიოს მეზობელ რადიოარხებში, წარმოქმნას ხმაური და სხვა ე.მ. ხელშემშლელი [11, 15,75,76].



ნახ. 2.9.1.1 ფილტრაცია რთული, რადგან იგი ძალიან ახლოს იმყოფება სასურველ სიგნალთან [11]

მეორე თავის დასკვნა

ILS-LOC სისტემა წარმოადგენს ხმელეთზე განლაგებული ILS-LOC გადამცემისა და საჰაერო ხომალდზე არსებული სანავიგაციო რადიომიმღების ერთიანობას.

საკურსო რადიოშუქურის ფუნქციონირება ეფუძნება ამპლიტუდური მოდულაციის ტექნიკას, კერძოდ, ორი გვერდითი ზოლით და ჩახშობილი გადამტანით (DSB-SC) მოდულაციის გამოყენებას სივრცითი მოდულაციის ფორმირებისათვის. რადიოგადამცემი ამ მიზნით იყენებს ამპლიტუდურად მოდულირებული სიგნალების წყვილს: ერთი გადამტანით და გვერდითი ზოლებით (CSB) და მეორეს მხოლოდ გვერდითი ზოლებით, ჩახშობილი გადამტანით (DSB-SC). ორივე მათგანში გამოყენებულია 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები.

საჰაერო ხომალდზე განთავსებული სანავიგაციო რადიომიმღები, რომელიც დაფუძნებულია ჰეტეროდინულ კონსტრუქციაზე, მგრძნობიარეა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების მიმართ. აღნიშნული ხელშეშლები იწვევს სასარგებლო სანავიგაციო სიგნალის დამახინჯებას ან ჩახშობას, რაც საბოლოოდ განაპირობებს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის არასწორ ფუნქციონირებას. განსაკუთრებულ საფრთხეს წარმოადგენს ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლა, განსაკუთრებით მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება.

იმისათვის, რომ უზრუნველყოფილი იყოს ILS-LOC სისტემის გამართული ფუნქციონირება, აუცილებელია დაცული იყოს ე.მ. თავსებადობა ILS-LOC რადიოსისტემასა და სიხშირულად მოდულირებულ (FM) რადიოსერვისს შორის.

თავი 3. ინტერმოდულაციური ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედება საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე

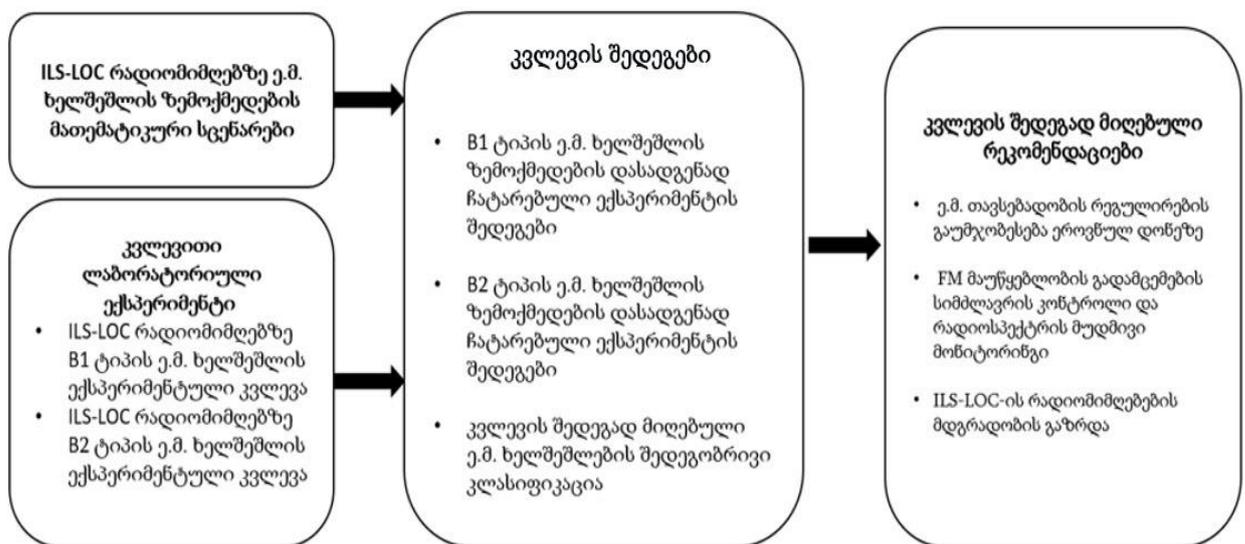
სადისერტაციო ნაშრომში ILS-LOC-ის სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების კრიტერიუმების შესასწავლად ჩატარებულია კვლევა შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. ლიტერატურის მიმოხილვა: წიგნების, სტატიებისა და სხვა რესურსების შესწავლა, რომლებიც დაკავშირებულია სანავიგაციო სისტემებზე ე.მ. ხელშეშლების, მათ შორის, ინტერმოდულაციური ზემოქმედების შესწავლასთან;
2. აღწერილია ILS-LOC-ის ფუნქციური მოდელი და წარმოდგენილია მნიშვნელოვანი მონაცემები ე.მ. თავსებადობის დაცვის შესახებ;
3. გაანალიზებულია ინტერმოდულაციური ზემოქმედება. მათ შორის განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია მესამე რიგის ინტერმოდულაციურ ზემოქმედებასა და მისი წარმოქმნის მექანიზმებზე;
4. ნაშრომის მესამე თავში რომელიც სადისერტაციო ნაშრომის ყველაზე მნიშვნელოვანი ნაწილია, წარმოდგენილია მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) წარმოქმნის მექანიზმები ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში;
5. ILS-LOC სისტემის ფუნქციურ მოდელზე დაყრდნობით შექმნილია ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების სხვადასხვა მათემატიკური სცენარები, როდესაც ე.მ. ხელშეშლა იწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) განსხვავებულ რეაგირებებს;
6. ჩატარებულია ორი კვლევითი პრაქტიკული ექსპერიმენტი, რომელთაგან პირველი ექსპერიმენტის მიზანია ILS-LOC რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებისას (B1 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა) სხვადასხვა რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის ზღვრული მნიშვნელობების განსაზღვრა. ხოლო მეორე ექსპერიმენტი ეხება სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების აღმოჩენას და დაცვითი თანაფარდობების დადგენას, იმ შემთხვევაში დროსაც ე.მ. ხელშეშლების

ზემოქმედების შედეგად ხდება ILS-LOC რადიომიმღების მგრძობელობის დაქვეითება (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა);

7. ექსპერიმენტის შედეგების და ასევე სხვა სამეცნიერო ნაშრომებზე დაყრდნობით შექმნილია ე.მ. ხელშეშლების ახალი კლასიფიკაცია ზემოქმედების მიხედვით;

8. სადისერტაციო კვლევის შედეგების მიხედვით შემუშავებულია რეკომენდაციები, რომელთა გათვალისწინება შეამცირებს სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების ალბათობას და გაზრდის საჰაერო ხომალდის ფრენის უსაფრთხოებას.



ნახ. 3.1 სადისერტაციო კვლევის სტრუქტურა

3.1 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში

ILS-LOC რადიომიმღებში მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება (IMD3) წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც ორი ან მეტი ძლიერი სიგნალის ზემოქმედებით მიმღების აქტიური ელემენტები გადადიან მუშაობის არაწრფივ რეჟიმში. არაწრფივი რეჟიმის წარმოქმნა წარმოადგენს თანამედროვე რადიომიმღებების ერთ-ერთ ძირითად საოპერაციო შეზღუდვას, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როდესაც რადიომიმღები მუშაობს მაღალი სიმძლავრის სამაუწყებლო სიგნალების სიახლოვეს.

ILS-LOC რადიომიმღების საიმედო ფუნქციონირების შეფასებისას დომინანტურ არაწრფივ პროცესად განიხილება მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება

(IMD3), რომელიც ზემოაღნიშნული კლასიფიკაციის მიხედვით მიეკუთვნება B1 ტიპის ელექტრომაგნიტურ ხელშეშლას.[75,76]

ყველაზე ხშირად ILS-LOC რადიომიმღებში მესამე რიგის ინტერმოდულაცია (IMD3) წარმოიქმნება მიმღების პირველ კასკადში (front end).

როდესაც პირველ RF გამაძლიერებელზე ან მიქსერზე მოქმედებს მაღალი ამპლიტუდის მქონე ორი ან მეტი ძლიერი სიგნალი, შემაჯავლი ძაბვის დონე იმდენად იზრდება, რომ აქტიური ელემენტების (ტრანზისტორების) მახასიათებლები გადადის წრფივი რეჟიმიდან არაწრფივში (სატურაცია).[75,76]

მოწყობილობის არაწრფივი გამომავალი ძაბვა, v_{out} , შეიძლება აღიწეროს შემაჯავლი ძაბვის, v_{in} , მიმართ ტეილორის რიგის გაფართოებით:

$$v_{out} = a_1 v_{in} + a_2 v_{in}^2 + a_3 v_{in}^3 + \dots , \quad (3.1.1)$$

სადაც:

a_1, a_2, a_3 - წარმოადგენს არაწრფივი მახასიათებლის კოეფიციენტებს;

$a_1 v_{in}$ - აღწერს სასურველ წრფივ გაძლიერებას;

$a_2 v_{in}^2$ - აღწერს მეორე რიგის არაწრფივ პროდუქტებს, რომლებიც, როგორც წესი, სიხშირით შორდებიან LOC-LOC სისტემის სამუშაო დიაპაზონს და, შესაბამისად, ნაკლებად საშიშნი არიან;

$a_3 v_{in}^3$ - აღწერს სწორედ მესამე რიგის არაწრფივ პროდუქტებს (IMD3), რომლებიც ყველაზე კრიტიკული და საშიშია. ეს კომპონენტები სპექტრულად ყველაზე ახლოს ექცევა სასარგებლო სიგნალის სიხშირესთან, რაც მათი ეფექტური ფილტრაციის საშუალებას არ იძლევა.[75,76]

ILS-LOC რადიომიმღების არაწრფივი მახასიათებლის ზემოქმედების შესასწავლად, დავუშვათ, რომ რადიომიმღების პირველ კასკადში შედის მაღალი ამპლიტუდის მქონე ორი ძლიერი FM სიგნალი:

$$v_{in} = A_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + A_2 \cdot \cos(\omega_2 t) , \quad (3.1.2)$$

სადაც, FM მაუწყებლების სიხშირეებია: $f_1 = 107.1$ მჰც და $f_2 = 107.9$ მჰც.

რადიომიმღების არაწრფივობის შედეგად, კერძოდ, ტეილორის მწკრივის მესამე რიგის წევრი ($a_3 \cdot v_{in}^3$) განაპირობებს ინტერმოდულაციური პროდუქტების წარმოქმნას. მესამე წევრის გაშლა გვაძლევს შემდეგ კომპონენტებს:[75]

$$v_{out}^{(3)} = a_3 \cdot v_{in}^3 = a_3 \cdot \left[\frac{3}{2} A_1^2 A_2 \cdot \cos((2\omega_1 - \omega_2)t) + \frac{3}{2} A_2^2 A_1 \cdot \cos((2\omega_2 - \omega_1)t) + \dots \right], \quad (3.1.3)$$

($a_3 \cdot v_{in}^3$) წარმოადგენს არაწრფივ შერევას, ანუ იმ სიგნალების წყაროს, რომელიც არ არსებობს ეთერში და წარმოადგენს რადიომიმღების შიდა, ხელოვნურად გენერირებულ სიგნალებს რომლის სიხშირეები გამოითვლება ფორმულებით:

$$f_{IM3,1} = |2 \cdot f_1 - f_2| \quad (3.1.4)$$

$$f_{IM3,2} = |2 \cdot f_2 - f_1|,$$

ამ კონკრეტულ FM სიხშირეებზე რიცხვითი მაგალითის განხილვისას მივიღებთ:

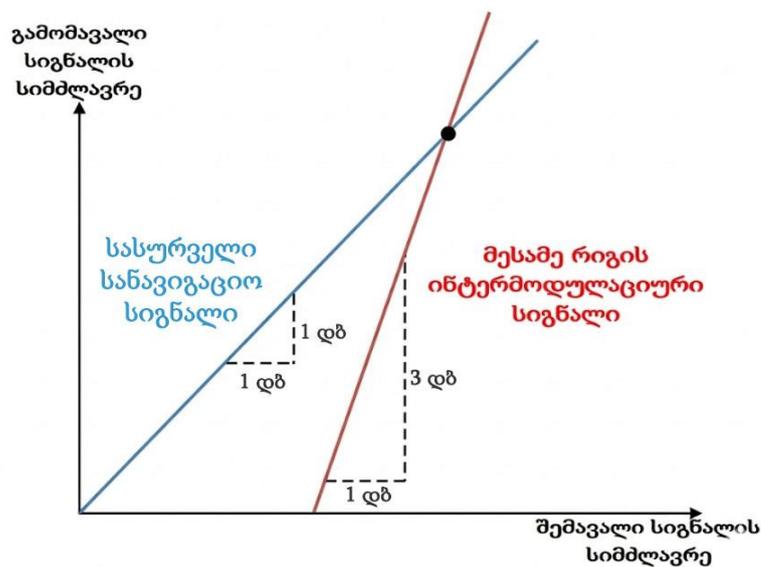
$$2 \cdot f_1 - f_2 = 2 \cdot 107.1 - 107.9 = 106.3 \text{ მჰც (ILS-LOC სიხშირული ზოლის მიღმა)}$$

$$2 \cdot f_2 - f_1 = 2 \cdot 107.9 - 107.1 = 108.7 \text{ მჰც (ILS-LOC სიხშირულ ზოლში)}$$

როგორც ჩანს, 108.7 მჰც სიგნალი ზუსტად ექცევა ILS-LOC -ის რადიომიმღების სიხშირულ ზოლში (108.10–111.95 მჰც). ეს ცხადყოფს, რომ რადიომიმღების პირველი კასკადი თავად წარმოქმნის ცრუ სიგნალს, რომელიც სპექტრულად იდენტურია ნამდვილ ILS-LOC სიგნალთან, რაც პირდაპირ იწვევს კრიტიკულ სანავიგაციო შეცდომებს.[75,76]

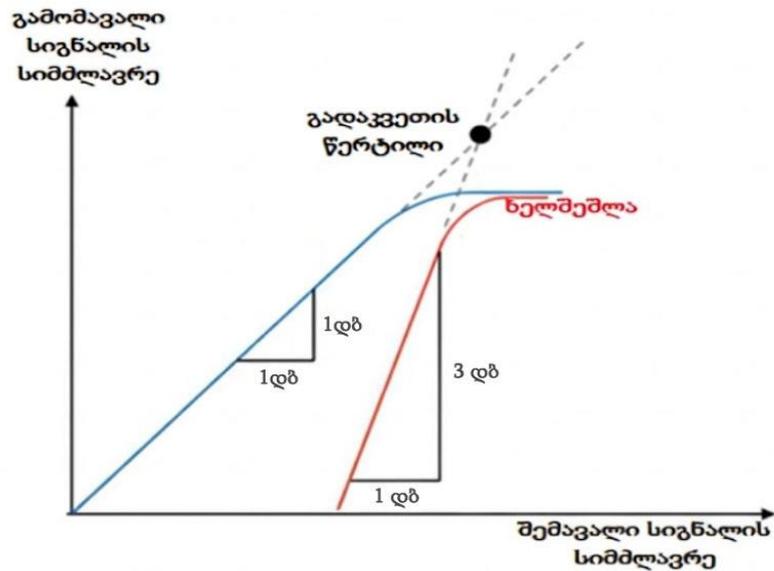
ILS-LOC რადიომიმღებისთვის მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტი (IMD3) განსაკუთრებულ საფრთხეს წარმოადგენს მისი სპექტრული მდებარეობისა და შიდა გენერაციის გამო. ეს კომპონენტი იმდენად კრიტიკულია, რომ მიმღებს არ შეუძლია მისი გაფილტვრა ან ამოცნობა. ფილტრაციის შეუძლებლობა განპირობებულია იმით, რომ IMD3 კომპონენტები წარმოიქმნება ორი გარე ძლიერი სამაუწყებლო სიგნალის (ω_1 და ω_2) შერევის შედეგად ისე, რომ საბოლოო სიხშირე $f_{IM3} = |2f_2 - f_1|$ ექცევა სასურველი სიგნალის სამუშაო სიხშირულ ზოლში (In-Band), ანუ ILS-LOC სიხშირულ ზოლში (108.10–111.95 მჰც). ვინაიდან IMD3 სიგნალი და

ნამდვილი ILS-LOC სიგნალი ერთსა და იმავე სიხშირულ არხში არიან, ისინი თანაბრად გაივლიან ILS-LOC რადიომიმღების ყველა შემდგომ ფილტრს. გარდა ფილტრაციის პრობლემისა, მესამე რიგის ინტერმოდულირებული სიგნალი გაცილებით რთულ პრობლემას წარმოადგენს მისი დინამიკური მახასიათებლის გამო. ფუნდამენტური სიგნალის ყოველი 1 დბ-ით მომატებისას, მესამე რიგის ინტერმოდულირებული სიგნალი იზრდება 3 დბ-ით. შესაბამისად, ინტერმოდულაციური სიგნალის სიმძლავრე უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე ძირითადი სიგნალის სიმძლავრე და თეორიულად აუცილებლად გადაკვეთს მას.[75,76]



ნახ. 3.1.1 ფუნდამენტური სიგნალის ყოველი 1 დბ-ით გაზრდისას, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალი იზრდება 3 დბ-ით [11]

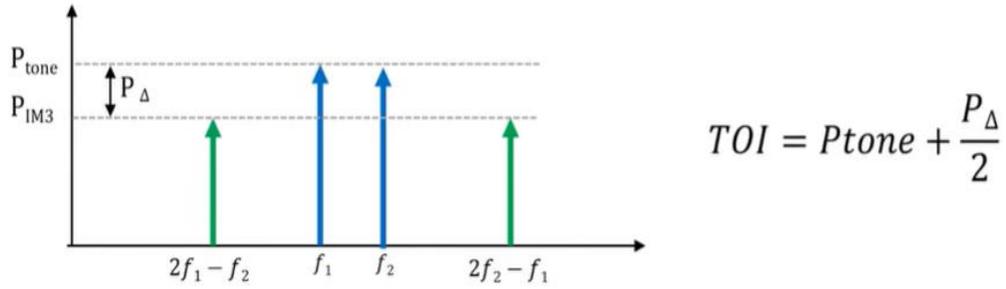
თუმცა, პრაქტიკაში, როდესაც სიგნალის სიმძლავრე მის აპარატურულ მაქსიმუმს მიუახლოვდება, ინტერმოდულაციის მრუდები იცვლიან ფორმას და ხდება სიგნალის ზედდება (კომპრესია). ეს ეფექტი იწვევს არა მხოლოდ ინტერმოდულაციური, არამედ თვითონ ძირითადი სიგნალის დაზიანებასაც ILS-LOC რადიომიმღებში, რაც კიდევ უფრო ართულებს პრობლემის აღმოფხვრას [31,75,76].



ნახ. 3.1.2 ინტერმოდულაციის გამო ხელშეშლის წარმოქმნა [30]

წერტილს, რომელზეც მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალი და ფუნდამენტური (სასურველი) სიგნალის ამპლიტუდები ერთმანეთს კვეთს, ეწოდება მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალის გადაკვეთის წერტილი (TOI). ეს არის თეორიული წერტილი, რომელიც გამოითვლება გაზომილი მნიშვნელობების საფუძველზე. მესამე რიგის გადაკვეთის წერტილს პირდაპირ ვერ ვზომავთ. ამ წერტილის დადგენა არის მოწყობილობის წრფივობის შეფასების ყველაზე გავრცელებული მეთოდი. რაც უფრო მაღალია მესამე რიგის გადაკვეთის წერტილი, მით უკეთესია მოწყობილობის წრფივობა და მით ნაკლებ ინტერმოდულაციურ დამახინჯებას წარმოქმნის ის [4, 75,76].

მესამე ხარისხის გადაკვეთის წერტილის გამოსათვლელად ან გასაზომად მოწყობილობას მიეწოდება ორი სიგნალი. ეს სიგნალი, როგორც წესი, არის თანაბარი ამპლიტუდის მქონე სიგნალები. შემდეგ იზომება ამ ორი სიგნალის ამპლიტუდა და, ასევე, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალების ამპლიტუდა. სიმძლავრეების სხვაობის საფუძველზე და მარტივი ფორმულის გამოყენებით, შესაძლებელია მესამე რიგის გადაკვეთის წერტილის გამოთვლა [4, 30, 31,76].



ნახ. 3.1.4 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალის და სასურველი სიგნალის გადაკვეთის წერტილის (TOI) გამოთვლა [31]

3.2 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) ზემოქმედების მათემატიკური სცენარები

აღნიშნული სცენარების მოდელირება ეყრდნობა სიგნალების ანალიზურ წარმოდგენას ჰარმონიული ფუნქციების სუპერპოზიციის სახით. ILS-LOC სისტემის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები (CSB და SBO) აღწერილია როგორც პერიოდული ჰარმონიული კომპონენტების ერთობლიობა, რაც საშუალებას იძლევა, მათ მათემატიკურ მოდელში განხორციელდეს ინტერმოდულაციური კომპონენტის ადიტიური ინტეგრირება. ამ მიდგომით დგინდება ჯამური სიგნალის მყისიერი ამპლიტუდის და ფაზის ცვლილებები ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედებით.[75,76]

ინტერმოდულაციური პროცესების შედეგად ILS-LOC-ის სიხშირულ ზოლში ჩნდება მესამე რიგის დამახინჯება, რომელსაც შეუძლია საჰაერო ხომალდის რადიომიმღებში ცრუ გადახრის სიგნალის წარმოქმნა. ასეთ შემთხვევაში, საჰაერო ხომალდმა შეიძლება მიიღოს დამახინჯებული სანავიგაციო სიგნალები, რის შედეგადაც, მფრინავმა შესაძლოა ჩათვალოს, რომ ხომალდი გადახრილია ა.დ.ზ.-ის ცენტრალური ხაზიდან მარცხნივ ან მარჯვნივ. ამგვარი მცდარი სიგნალის მიღებამ შეიძლება გამოიწვიოს კურსის არასწორი ჩვენება, რაც ზრდის საჰაერო ხომალდის დეზორიენტაციისა და ფრენის უსაფრთხოების დარღვევის რისკს.

საკურსო რადიოშუქურა (ILS-LOC) იყენებს CSB (გადამტანი სიგნალს გვერდითი ზოლებით) და SBO (სიგნალს მხოლოდ გვერდითი ზოლები) მოდულაციის ტექნიკას. CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალი არის ამპლიტუდურად მოდულირებული სიგნალი, რომელიც შედგება 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო

ტონალური სიგნალებისგან. ეს სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ნაწილდება ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის ცენტრალური ხაზის ორივე მხარეს და სწორედ მათი მოდულაციის ინდექსებს შორის სხვაობით განისაზღვრება საჰაერო ხომალდის მდებარეობა ასაფრენ-დასაფრენ ზოლთან მიმართებით. CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) მათემატიკურად გამოისახება როგორც:[75,76]

$$S_{CSB}(t) = A_c \left[1 + m_1 \cos(2\pi f_{90}t) + m_2 \cos(2\pi f_{150}t) \right] \cos(2\pi f_c t), \quad (3.2.1)$$

სადაც:

A_c - არის გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდა;

m_1 და m_2 - ამ ორი მამოდულირებელი სიგნალის მოდულაციის ინდექსები;

f_{90} და f_{150} - მამოდულირებელი სიგნალების სიხშირეები;

f_c - გადამტანი სიგნალის სიხშირე.

სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO) არის სიგნალის ტიპი, სადაც სანავიგაციო ტონალური სიგნალები მოდულაციისას იყენებენ მხოლოდ გვერდით ზოლებს, ხოლო გადამტანი არის ჩახშობილი. მათემატიკურად გამოისახება როგორც:[75,76]

$$S_{SBO}(t) = A_s \left[m_1 \cos(2\pi f_{90}t) + m_2 \cos(2\pi f_{150}t) \right] \cos(2\pi f_c t), \quad (3.2.2)$$

სადაც:

A_s - არის გვერდითი ზოლების ამპლიტუდა;

m_1 და m_2 - მამოდულირებელი სიგნალების მოდულაციის ინდექსები;

f_{90} და f_{150} - მამოდულირებელი სიგნალების სიხშირეები;

f_c - გადამტანი სიგნალის სიხშირე.

კომბინირებული სიგნალი (CSB + SBO), რომელიც მიიღება საჰაერო ხომალდის რადიომიმდების მიერ, არის გადამტანი სიგნალის გვერდითი ზოლებით (CSB) და სიგნალის მხოლოდ გვერდითი ზოლებით (SBO) ჯამი:[75,76]

$$s_{\text{total}}(t) = s_{\text{CSB}}(t) + s_{\text{SBO}}(t)$$

$$s_{\text{total}}(t) = \left[(A_{\text{CSB1}} + A_{\text{SBO1}}) \cos(2\pi \cdot 90t) + (A_{\text{CSB2}} + A_{\text{SBO2}}) \cos(2\pi \cdot 150t) \right] \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (3.2.3)$$

ა.დ.ზ.-ის ცენტრალურ ხაზზე ვრცელდება მხოლოდ CSB (გადამტანი სიგნალი გვერდითი ზოლებით) სიგნალი, სადაც 150 ჰც და 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს აქვთ თანაბარი სიმძლავრე. ამ დროს კურსიდან გადახრის მაჩვენებელი ცენტრალური ხაზიდან გადახრას არ აჩვენებს [22, 33, 75, 76].

SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალში სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ერთმანეთის მიმართ საპირისპირო ფაზაში არიან.

მარჯვენა მხარეს SBO სიგნალის 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი და CSB სიგნალის 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ფაზაში არიან, ამიტომ ისინი ჯამდება. ამ მხარეს რჩება უფრო ძლიერი 150 ჰც სიხშირის სიგნალი, ხოლო 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს აქვთ საპირისპირო ფაზა.[76]

მარცხენა მხარეს კი 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს აქვთ საპირისპირო ფაზა, ხოლო 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ფაზაში არიან [22,75].

როდესაც, ორი ძლიერი FM სიგნალი განლაგებულია სიხშირეებზე f_1 და f_2 , შესაძლებელია წარმოქმნილ იქნეს ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რომლებიც გამოითვლება ფორმულით:

$$f_{\text{IMD}} = m \cdot f_1 + n \cdot f_2, \quad (3.2.4)$$

სადაც:

f_1 და f_2 არის FM მაუწყებლობის სიხშირეები. m და n მთელი რიცხვებია (შესაძლოა იყოს დადებითი ან უარყოფითი, რომლებიც განსაზღვრავენ ინტერმოდულაციური სიგნალების რიგითობას).[76]

როდესაც ინტერმოდულაციური პროდუქტებიდან რომელიმე მოხვდება საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღების სიხშირულ ზოლში (108-111.95 მჰც), წარმოიქმნება ე.მ. ხელშეშლა, რაც იწვევს საკურსო რადიომუქურის სიგნალის

დამახინჯებას. მესამე რიგის ინტერმოდულაციური (IMD) პროდუქტები ყველაზე გავრცელებული ე.მ. ხელშემშლის წყაროა. მათი წარმოქმნა ხდება მაშინ, როდესაც $m + n = 3$. მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტების სიხშირეები გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$f_{IMD} = 2f_1 - f_2 \text{ ან } f_{IMD} = 2f_2 - f_1 , \quad (3.2.5)$$

როდესაც, გვაქვს ორი ახლომდებარე FM მაუწყებლობის რადიოსადგური შემდეგი სიხშირეებით:

$f_1 = 97.5$ მჰც (პირველი FM რადიოსადგური) და $f_2 = 103.5$ მჰც (მეორე FM რადიოსადგური),

მიიღება შემდეგი ინტერმოდულაციური პროდუქტები:

პირველი პროდუქტი: $2f_1 - f_2$

$$f_{IMD} = 2 \times 97.5 - 103.5 = 195 - 103.5 = 91.5 \text{ მჰც} , \quad (3.2.6)$$

შედეგი არის 91.5 მჰც, რაც საკურსო რადიოშუქურის სიხშირულ ზოლს (108-112 მჰც) გარეთ იმყოფება, ამიტომ ელექტრომაგნიტურ ხელშემშლას არ გამოიწვევს.

მეორე პროდუქტი: $2f_2 - f_1$

$$f_{IMD} = 2 \times 103.5 - 97.5 = 207 - 97.5 = 109.5 \text{ მჰც} , \quad (3.2.7)$$

შედეგი არის 109.5 მჰც, რაც საკურსო რადიოშუქურის სამუშაო სიხშირულ ზოლში (108-112 მჰც) ხვდება. შედეგი აჩვენებს, რომ ახლომდებარე FM რადიოგადამცემების მიერ წარმოქმნილი ინტერმოდულაციური პროდუქტები იწვევს ე.მ. ხელშემშლას ILS-LOC რადიომიმდებარეში.[76]

3.2.1 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება (IMD3) CSB სიგნალში

ინტერმოდულაციური კომპონენტები მოიცავს არაჰარმონიკული სპექტრის მქონე პარაზიტულ სიგნალებს, რომლებიც დაკავშირებულია 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის ძირითად სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებთან. დამატებითი კომპონენტები იწვევს CSB სიგნალის დამახინჯებას, რაც განაპირობებს ILS-LOC-ის

კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) არასწორ ფუნქციონირებას. ინტერმოდულაციური კომპონენტების ამპლიტუდის კონკრეტული მნიშვნელობა A_{IMD} დამოკიდებულია სისტემის არაწრფივობაზე და თავდაპირველი ტონების სიმძლავრეზე. ძლიერი ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) არსებობა სერიოზულად აუარესებს ILS-LOC-ის რადიომიმღების მუშაობას, განსაკუთრებით მაღალი სიზუსტის დაშვების დროს, როდესაც სიგნალის სიზუსტე კრიტიკულად მნიშვნელოვანია. ინტერმოდულაციური დამახინჯება არღვევს მოდულაციის ინდექსთა სხვაობის დამოკიდებულებას, რაც იწვევს არასწორი სანავიგაციო სიგნალების წარმოქმნას და გავლენას ახდენს დაშვების სიზუსტეზე.[75,76] ILS-LOC სისტემაში მოდულაციის ინდექსი განსაზღვრავს, თუ რა ხარისხით არის სიგნალი მოდულირებული 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალებით. მოდულაციის ინდექსთა სხვაობა უზრუნველყოფს საჰაერო ხომალდის ჰორიზონტალური მდებარეობის განსაზღვრას ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის (ა.დ.ზ.) ცენტრალური ხაზის მიმართ. როდესაც IMD პროდუქტი წარმოიქმნება ახლომდებარე VHF გადამცემიდან (რომელიც განთავსებულია საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) გადამტანი სიხშირის მახლობლად, დაახლოებით 108,1 მჰც, მას შეუძლია შეაფერხოს ამპლიტუდურად მოდულირებული CSB (გადამტანი და გვერდითი ზოლი) სიგნალი. ამ შემთხვევაში ხდება სანავიგაციო ინფორმაციის და სიგნალის ხარისხის დაქვეითება, რაც მიმღებში ართულებს ან შეუძლებელს ხდის 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების აღმოჩენას. შედეგად, საჰაერო ხომალდის ILS-LOC რადიომიმღები ვერ უზრუნველყოფს სანავიგაციო ინფორმაციის სწორ დამუშავებას.[75,76]

CSB სიგნალისთვის, მათემატიკურად ინტერმოდულაციური დამახინჯება გამოისახება შესაბამისი ფორმულით:

$$S_{CSB}(t) = (A_c + \varepsilon' \cos(2\pi f_{IMD}t)) [1 + m_1 \cos(2\pi f_{90}t) + m_2 \cos(2\pi f_{150}t)] \cos(2\pi f_c t), \quad (3.2.1.1)$$

სადაც:

(ϵ') - ეფსილონი არის ინტერმოდულაციური სიგნალის f_{IMD} ამპლიტუდა, რომელიც ამახინჯებს 90 და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებს;

A_c - გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდა;

f_{IMD} - ინტერმოდულაციური სიგნალის სიხშირე;

m_1 და m_2 - არიან 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსები;

f_c - არის გადამტანი სიგნალის სიხშირე.

სანავიგაციო ტონალური სიხშირეების მესამე რიგის ინტერმოდულაციური კომპონენტები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით:[75,76]

$$f_{IMD3} = 2f_1 \pm f_2 \text{ და } 2f_2 \pm f_1, \quad (3.2.1.2)$$

რაც გვადლევს:

$$\begin{aligned} f_{IMD3} &= 2(90) - 150 = 30 \text{ ჰც} \\ f_{IMD3} &= 2(90) + 150 = 330 \text{ ჰც} \\ f_{IMD3} &= 2(150) - 90 = 210 \text{ ჰც} \\ f_{IMD3} &= 2(150) + 90 = 390 \text{ ჰც}, \end{aligned} \quad (3.2.1.3)$$

ამრიგად, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური კომპონენტები ჩნდება 30 ჰც, 330 ჰც, 210 ჰც და 390 ჰც სიხშირეზე.

3.2.2 მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ზემოქმედება SBO (DSB-SC) სიგნალზე

SBO (სიგნალი მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალი უფრო მგრძნობიარეა ე.მ. ხელშეშლის მიმართ, რადგან მისი გადამტანი სიხშირე ჩახშობილია. ნებისმიერმა ინტერმოდულაციურმა პროდუქტმა, რომელიც გვერდითი ზოლის სიხშირეებთან ახლოს განთავსდება, შეიძლება გამოიწვიოს ხმაური ან დამახინჯება 90 ჰც და 150 ჰც სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებში. ამან შესაძლოა დაარღვიოს ამ სიგნალებს შორის ამპლიტუდური ბალანსი, რაც ILS-LOC რადიომიმდების არასწორ ფუნქციონირებას გამოიწვევს [4, 22, 33, 75,76].

SBO (მხოლოდ გვერდითი ზოლები) სიგნალისთვის ინტერმოდულაციური დამახინჯება აღიწერება როგორც:

$$S_{SBO}(t) = (A_s + \epsilon' \cos(2\pi f_{IMD}t)) [m_1 \cos(2\pi f_{90}t) + m_2 \cos(2\pi f_{150}t)] \cos(2\pi f_c t), \quad (3.2.2.1)$$

სადაც:

ϵ' - ეფსილონი არის ინტერმოდულაციური სიგნალის ამპლიტუდა SBO (მხოლოდ გვერდითი ზოლები) სიგნალში. რადგან SBO სიგნალს გადამტანი სიხშირე აქვს ჩახშობილი, IMD3 პირდაპირ გავლენას ახდენს 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსებზე, რაც ამახინჯებს სივრცით მოდულაციას;[75,76]

A_s - (მხოლოდ გვერდითი ზოლებით) სიგნალის ამპლიტუდა;

$m_1 \cos(2\pi f_{90}t)$ - წარმოადგენს 90 ჰც სიხშირის მამოდულირებელ სიგნალს;

$m_2 \cos(2\pi f_{150}t)$ - წარმოადგენს 150 ჰც სიხშირის მამოდულირებელ სიგნალს;

f_c - გადამტანი სიხშირე საკურსო რადიომუქურისთვის 108.1 მჰც - 111.95 მჰც სიხშირულ ზოლში.

3.2.3 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში მოდულაციის ინდექსის სიდიდის ამოცნობა ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) გარეშე

მოდულაციის ინდექსი (M) თითოეული სანავიგაციო ტონალური სიგნალისთვის (90 ჰც და 150 ჰც) განისაზღვრება, როგორც მოდულაციის პროცენტი, რომლითაც მოცემული სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ამპლიტუდურად მოდულირებენ გადამტან სიგნალს [4].

$$M_{90} = \frac{A_{90}}{A_{\text{გადამტანი}}}, M_{150} = \frac{A_{150}}{A_{\text{გადამტანი}}}, \quad (3.2.3.1)$$

სადაც:

A_{90} - არის 90 ჰც სიხშირის მამოდულირებელი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის ამპლიტუდა;

A_{150} - არის 3კ სიხშირის მამოდულირებელი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის ამპლიტუდა;

A_{90} - გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდა.

იდეალურად წრფივ სისტემაში, ამ ორი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის მოდულაციის ინდექსებს შორის სხვაობა (DDM) განსაზღვრავს საჰაერო ხომალდის გვერდით გადახრას ცენტრალური ხაზიდან: [75,76]

$$\Delta M = M_{150} - M_{90} , \quad (3.2.3.2)$$

მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა ანგარიშდება 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსის გამოყენებით შემდეგი ფორმულით:

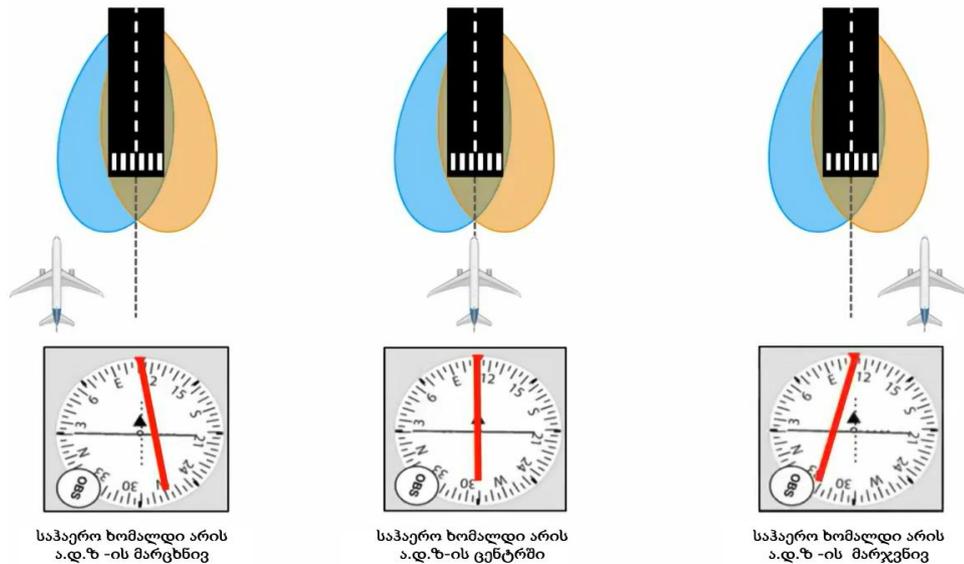
$$DDM = \frac{U_{90\text{ჰც}} - U_{150\text{ჰც}}}{U_{90\text{ჰც}} + U_{150\text{ჰც}}} , \quad (3.2.3.3)$$

როდესაც:

$DDM = 0$ საჰაერო ხომალდი იმყოფება ა.დ.ზ.-ის ცენტრალურ ხაზზე;

თუ $DDM < 0$, 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი უფრო ძლიერია და იმყოფება ა.დ.ზ.-ის მარცხნივ;

თუ $DDM > 0$, 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი უფრო ძლიერია და იმყოფება ა.დ.ზ.-ის მარჯვნივ [22,75,76].

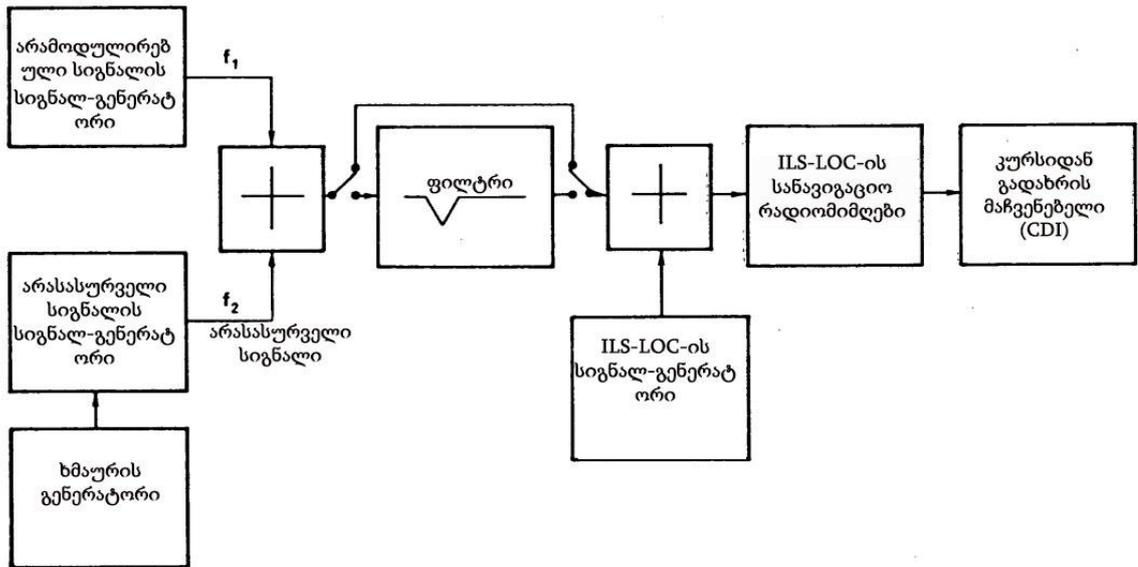


ნახ. 3.2.3.1 მფრინავისთვის მიწოდებული სანავიგაციო ინფორმაცია კურსიდან გადახრის მაჩვენებლით [22]

3.3 კვლევითი ექსპერიმენტი მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებით გამოწვეული ე.მ. ხელშემლის ზემოქმედების დასადგენად საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სანავიგაციო რადიომიმღებზე

საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ჰეტეროდინული ტიპის სანავიგაციო რადიომიმღებებზე სიხშირულად მოდულირებული (FM) მაუწყებლობისგან წარმოქმნილი მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) ტიპის ე.მ ხელშემლების (EMI) ზემოქმედების დასადგენად და შესაფასებლად ლაბორატორიული ექსპერიმენტი ჩატარდა სპეციალიზებულ რადიომონიტორინგის კვლევით ლაბორატორიაში.

ე.მ. ხელშემლის ზეგავლენის იმიტაცია სპეციალიზებულ სამუშაო სივრცეში ტესტირებული იქნა შემდეგი სქემის მიხედვით.



ნახ. 3.3.1 მოცემულია ინტერმოდულაციური სიგნალების ტესტირების ბლოკ-სქემა

ექსპერიმენტების საიმედო შედეგების უზრუნველსაყოფად გამოყენებული იყო სერტიფიცირებული საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ჰეტეროდინული ტიპის სანავიგაციო რადიომიმღები.[75,76]

ე.წ. სასურველი და არასასურველი სიგნალების გენერირებისათვის [71], ასევე ILS-LOC რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედების დასადგენად, გამოყენებულ იქნა გერმანული კომპანია Rohde & Schwarz (R&S)-ის ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებები, რომლებიც სრულად თავსებადია ICAO-ს მოთხოვნებთან. R&S უზრუნველყოფს ყველაზე ზუსტ რადიომონიტორინგის აპარატურას, რომლებმაც ამ ექსპერიმენტის ჩატარებისას ზუსტად შეფასა სანავიგაციო რადიომიმღებზე სხვადასხვა ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზეგავლენა.

ექსპერიმენტში სასურველი ILS-LOC სიგნალისა და არასასურველი სიგნალის მისაღებად გამოყენებული იყო R&S@SMA100A ტიპის სიგნალ-გენერატორი შემდეგი რეჟიმებით:[75,76]

- სასურველი ILS-LOC სიგნალის გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) R&S@SMA-K25 (ამპლიტუდური მოდულაცია);[76]
- არასასურველი FM მაუწყებლობის სიგნალების გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) FM (სიხშირული მოდულაცია).[75]

აღნიშნული ტიპის სიგნალის გენერატორი, უზრუნველყოფს მაღალი სიზუსტით მოდულირებულ საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სიგნალების გენერირებას და სიგნალის პარამეტრების, მათ შორის, მოდულაციის ინდექსის და ფაზების რეგულირების საშუალებას და მათი მახასიათებლების გაზომვას. სიგნალის გენერატორი უზრუნველყოფს პარამეტრების დაყენებას ICAO-ს (სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის) სტანდარტების შესაბამისად. [75,76]

ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის დასაფიქსირებლად და შესაფასებლად გამოყენებული იყო R&S@FSU სპექტრული ანალიზატორი.[75,76]

სანავიგაციო რადიომიმღებში შემოსული ILS-LOC სიგნალის დემოდულაციისთვის სპექტრული ანალიზატორი მუშაობდა R&S@FS-K15 რეჟიმში, რათა შეფასებულიყო მიღებული სიგნალის ძირითადი პარამეტრები.

სპექტრული ანალიზატორი (R&S@FSU) უზრუნველყოფს ზუსტ გაზომვებს საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სისტემის ძირითად პარამეტრებზე, მათ შორის [75,76]:

- მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობას (Difference in Depth of Modulation, DDM);
- სანავიგაციო ტონალური სიგნალების (90 ჰც და 150 ჰც) მოდულაციის ინდექსებს;
- გადამტანი და მამოდულირებელი ტონალური სიგნალების სიმძლავრესა და სიხშირეს;
- მესამე რიგის ინტერმოდულაციის კომპონენტების დონეს.

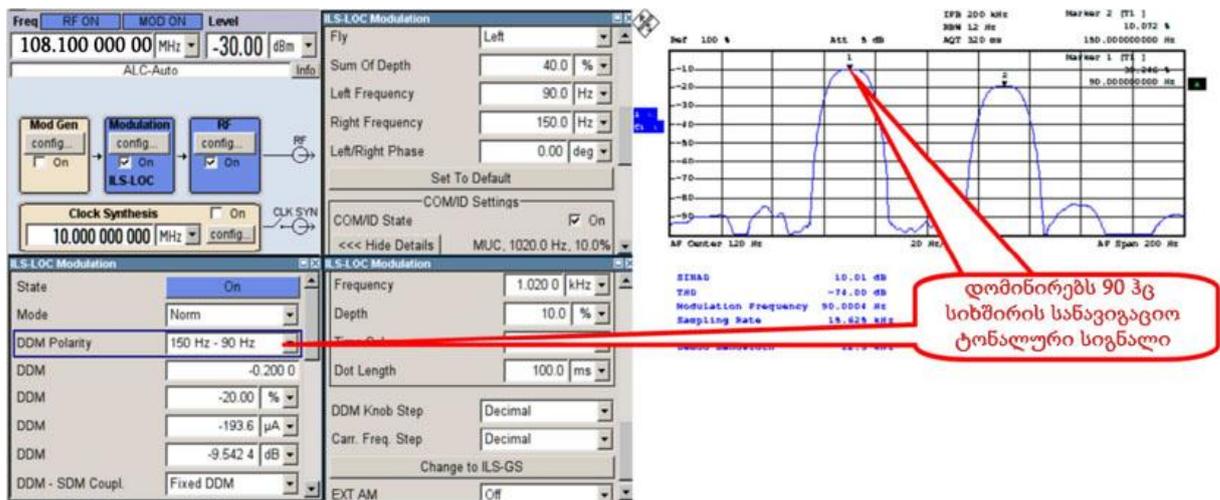
საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სისტემისთვის განსაზღვრული DDM პარამეტრის გაზომვით მიღებული მნიშვნელობის მაქსიმალური ცდომილება არ აღემატება $\Delta_{max} = \pm(0.0002 \text{ DDM} + 1\%-\text{ს})$.

საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ტესტირების რეჟიმში სპექტრული ანალიზატორი დამატებით უზრუნველყოფს შედეგების შეჯამებას ცხრილის სახით, სადაც ასახულია ყველა მნიშვნელოვანი პარამეტრი. გარდა გრაფიკებისა ექსპერიმენტის ვიზუალური შედეგისათვის გათვალისწინებულია კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI – Course Deviation Indicator) სკალა. შესაბამისად, ექსპერიმენტისათვის გამოყენებული აპარატურა უზრუნველყოფს როგორც რიცხვითი

შედეგების წარმოდგენას, ასევე სპექტრის გრაფიკულ ვიზუალიზაციას, რაც ამარტივებს შედეგების ანალიზს.

სპექტრული ანალიზატორი, მუშაობდა სწრაფი ფურიეს გარდაქმნის (FFT) რეჟიმში. ამ გარდაქმნის საშუალებით სიგნალი, რომელიც თავდაპირველად დროით განზომილებაში იყო წარმოდგენილი (როგორც დროის მიმართ ცვალებადი ამპლიტუდა), გარდაიქმნა სიხშირულ განზომილებაში, რამაც შესაძლებელი გახდა იმ სიხშირეების იდენტიფიცირება, სადაც კონცენტრირებულია სიგნალის სიმძლავრე და ე.მ. ხელშეშლა. ამგვარი გარდაქმნა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სუსტი სპექტრული კომპონენტების გამოსავლენად, რომლებიც რთულად შესამჩნევია, თუმცა გავლენას ახდენს სანავიგაციო მიმღების ფუნქციონირებაზე.

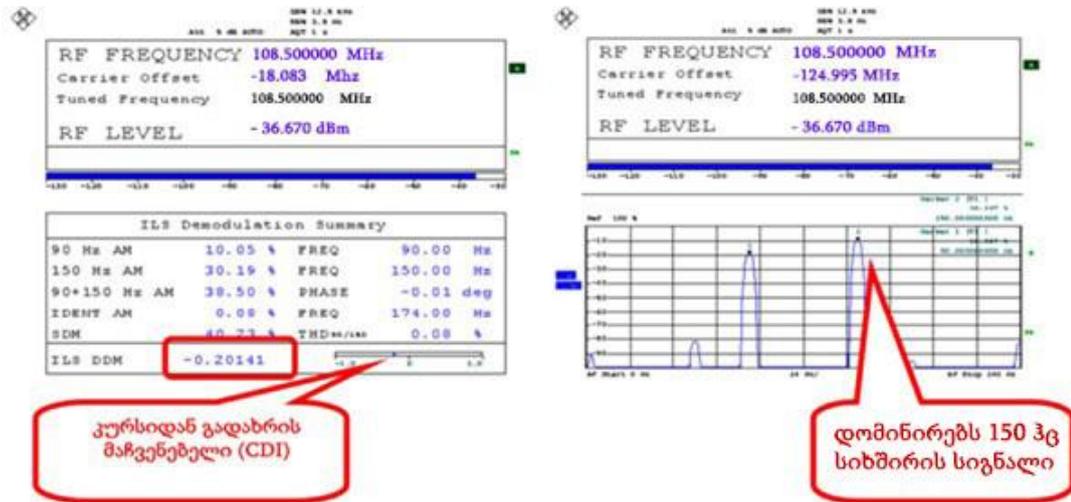
სპექტრული ანალიზატორით გამოვლენილ იქნა მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტები. სიგნალის დემოდულაციის შედეგად, გამოკვეთილად ჩანს დომინანტური 90 ჰც სიხშირის AM სიგნალი.[75,76]



ნახ. 3.3.2 სიგნალ-გენერატორის პარამეტრების დაყენება და სპექტრული ანალიზატორის გამოყენებით მიღებული შედეგი

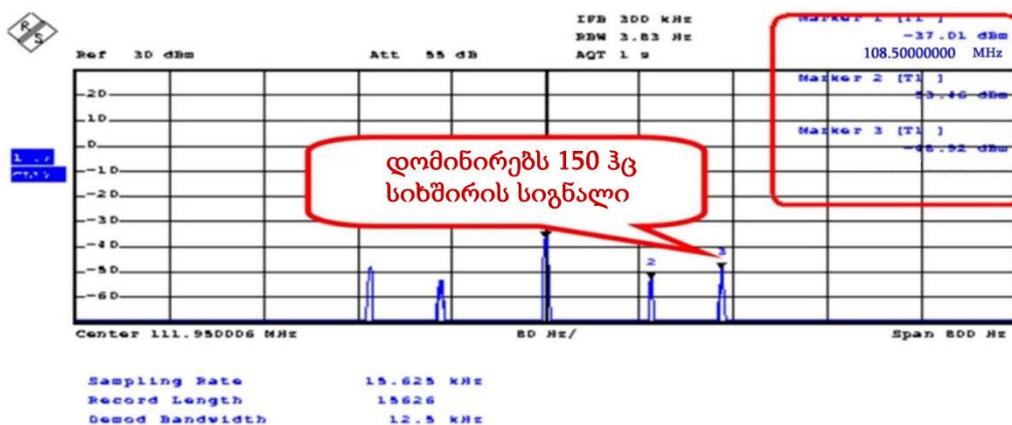
შედეგი მიუთითებს კურსიდან გადახრის მნიშვნელობას მარცხენა მიმართულებით, სიგნალის სიხშირულ სპექტრში მკვეთრად დომინირებს 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი, რაც ვიზუალურად ადასტურებს მოდულაციის ინდექსებს შორის დისბალანსს ორ სანავიგაციო ტონალურ სიგნალს შორის. აღნიშნული განსხვავება ასევე კარგად იკითხება გრაფიკიდან, რომელიც CDI-ს

მექანიკური ინდიკატორის სიმულაციას წარმოადგენს. ერთდროულად ფასდება, როგორც მთლიანი ინტერმოდულაციური დამახინჯების დონე, ასევე ჰარმონიკული და ინტერმოდულაციური სიგნალების მეორე და მესამე რიგის კომპონენტები [4].



ნახ. 3.3.3 წარმოდგენილია საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) სიგნალის დემოდულაციის ანალიზის შედეგები, სადაც აშკარად იკვეთება გადახრა მარცხნივ (DDM = -0.20141)

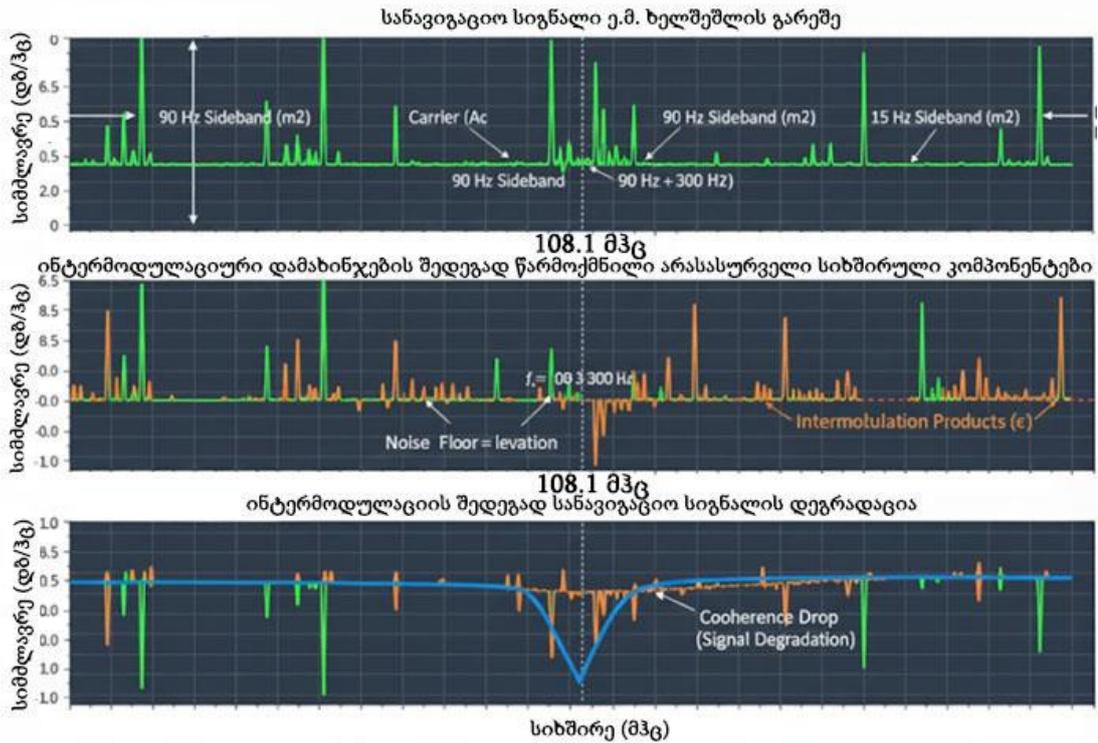
ცხრილში მოცემულია ტონალური მოდულაციის პარამეტრები, რომლებიც მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა, გადამტანი სიხშირე, ფაზათა სხვაობა და სიგნალის სიმძლავრეა, ხოლო სპექტრულ დიაგრამაზე დომინირებს 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი, რაც ნიშნავს გადამეტებულ მოდულაციას ამ კომპონენტზე.



ნახ. 3.3.4 ნაჩვენებია ILS-LOC სიგნალის აუდიოსიხშირის სპექტრი, სადაც აშკარად იკვეთება 150 ჰც კომპონენტის დომინირება

აღნიშნული დომინანცია მიუთითებს, რომ მოდულაციის ინდექსები არათანაბარია, რაც შეესაბამება DDM-ის უარყოფით მნიშვნელობას და კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) გადახრას მარცხენა მიმართულებით.

სიხშირულ სპექტრში ფიქსირდება გადამტან სიხშირეზე მოდულირებული ძირითადი ტონალური კომპონენტები და მათი ინტენსივობის დონე. აღნიშნული მონაცემები კრიტიკულია ILS-LOC სისტემის ტესტირების პროცესში. მკაფიოდ ფიქსირდება ორი ძირითადი ტონალური პიკი, რომლებიც შეესაბამება 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის მამოდულირებელ ტონალურ სიგნალებს. ეს არის ტიპური და მოსალოდნელი შედეგი. თუმცა, ამ პიკების გარდა, განსაკუთრებით ქვედა მარცხენა და მარჯვენა ფანჯრებში, ჩნდება რამდენიმე დამატებითი პიკი, რომლებიც არ შეესაბამება არც ძირითად ტონებს და არც მათ პირველ ჰარმონიკებს. მათი განლაგება, სიმაღლე და მათ შორის არსებული სიხშირეები ქმნის საფუძვლიან ვარაუდს, რომ ეს არის ინტერმოდულაციური პროდუქტები, რომლებიც მესამე რიგის კომბინაციით წარმოიქმნება სიგნალის შიგნით არაწრფივი გარდაქმნის შედეგად. ასევე ფიქსირდება სანავიგაციო ტონალური სიხშირეების ჰარმონიკების განმეორებითი, მრავალჯერადი კომპონენტები, რომლებიც განსაკუთრებით თვალსაჩინოა ზედა მარჯვენა ფანჯარაში, სადაც ჩანს, რომ ზოგიერთი პიკი თანმიმდევრულად წარმოადგენს 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის ტონალური სიგნალის მომატებულ მნიშვნელობებს. ჰარმონიკებისა და ინტერმოდულაციური პროდუქტების ამოცნობა შესაძლებელია მათი სიმეტრიული ან არარეგულარული განლაგებით, რომლებიც არ შეესაბამება სიგნალის ნორმირებულ სტრუქტურას.[75,76]



ნახ. 3.3.5 ექსპერიმენტის მიმდინარეობისას სპექტრული ანალიზატორის მიერ დაფიქსირებული ინტერმოდულაცია

ჩატარებული სპექტრული ანალიზით დასტურდება, რომ სისტემაში წარმოდგენილია ჰარმონიკები და ინტერმოდულაციური დამახინჯება, რაც მიუთითებს სიგნალის დამუშავების არაწრფივობაზე ან გადამტანის სიხშირის დაბინძურებაზე.

ორივე ექსპერიმენტში გამოყენებულია გაზომვის ობიექტური მეთოდი. ობიექტური მეთოდი წარმოადგენს ორსიგნალიან მეთოდს, რომელიც გულისხმობს სასურველი სიგნალისა და ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის გამომწვევი გადამცემის მოდულაციას სტანდარტული ფერადი ხმაურის სიგნალით ITU-R რეკომენდაციის მიხედვით [61].

ფერადი ხმაური არის სტაციონარული შემთხვევითი სიგნალი, რომლის სპექტრული სიმძლავრე არათანაბრადაა განაწილებული სიხშირის მიხედვით. იგი წარმოიშობა არაწრფივი კომპონენტების ან გარე ჩარევის შედეგად და ახასიათებს კონკრეტულ სიხშირეებზე ზემოქმედების უნარი. ლაბორატორიულ პირობებში რეკომენდებულია ამ ტიპის ხმაურის გამოყენება, რადგან მისი სპექტრული

მახასიათებლები მაქსიმალურად უახლოვდება სანავიგაციო რადიომიმღების მიერ მიღებულ არასასურველ სიგნალს [61].

გაზომვის ობიექტური მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მიეწოდება როგორც სასურველი, ასევე არასასურველი (ხელშემშლის) სიგნალი. მიღებული სიგნალის რეაქცია ფასდება ILS-LOC რადიომიმღების გამოსავალზე, რომლის ანალიზიც ხორციელდება სიგნალის სპექტრული ანალიზატორის გამოყენებით.

ორივე ექსპერიმენტის შემთხვევაში ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშემშლა დადასტურებულად ითვლებოდა როდესაც:

1. ILS-LOC სანავიგაციო მიმღების გამომავალი სიგნალის გადახრა სასურველი ცენტრალური ხაზიდან, კურსიდან გადახრის დენის მნიშვნელობით, აღწევს მინიმუმ ± 7.5 მიკროამპერს (0.00775 DDM) და აღნიშნული გადახრის მდგომარეობა შენარჩუნებულია 200 მილიწამზე მეტხანს ნებისმიერ 2 წამიანი დაკვირვების ინტერვალში.
2. კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე (CDI) აქტიურდებოდა გაფრთხილების ინდიკატორი, რომელიც ჩართული რჩებოდა არანაკლებ 1 წამით.

ტესტირებისას სასურველი სიგნალის დონე უნდა აღემატებოდეს მიმღების მგრძობელობის ზღვარს მინიმუმ 10 დბ-ით, რათა შეფასდეს სისტემის რეალური მდგრადობა ე.მ. ხელშემშლის ფონზე.

ILS-LOC რადიომიმღების მგრძობელობის ზუსტი მნიშვნელობები განსაზღვრულია საერთაშორისო სანავიგაციო სტანდარტებით, კერძოდ, ICAO-ს დანართ 10-ის, I ტომისა და RTCA/DO-186 დოკუმენტებში.

მგრძობელობის ზღვარი არის მინიმალური სიგნალის დონე, რომლის პირობებშიც ILS-LOC რადიომიმღები უზრუნველყოფს სასურველი სანავიგაციო სიგნალის საიმედო მიღებას. მიუხედავად იმისა, რომ ზუსტი ზღვარი დამოკიდებულია კონკრეტულ სტანდარტსა და რადიომიმღების ტიპზე (ამიტომ ერთიანი უნივერსალური მნიშვნელობა არ არსებობს), ტიპური მნიშვნელობები მერყეობს -86 დბ/მვ-დან -90 დბ/მვ-მდე.

3.3.1 პირველი კვლევითი ექსპერიმენტი: მესამე რიგის ინტერმოდულაციური სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობების განსაზღვრა ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედებისას

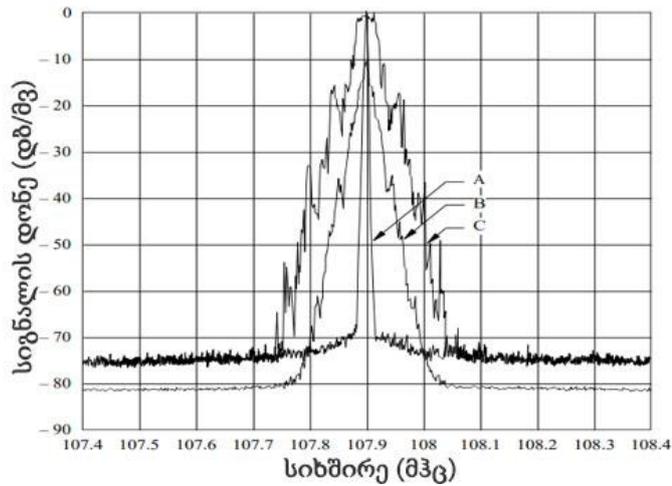
ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებით გამოწვეული ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის (B1 ტიპს ე.მ. ხელშეშლა) ზემოქმედების შესაფასებლად ჩატარდა ექსპერიმენტული კვლევა, რომლის მიზანაც იყო მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტების გამოვლენა და ე.მ. ხელშეშლის ზღვრული დონეების დადგენა.

ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების გამოსავლენად ექსპერიმენტში გამოყენებულია სამი სხვადასხვა მწარმოებლის სერტიფიცირებული ILS-LOC-ის სანავიგაციო რადიომიმღები რომელთაგან ორი მომართული იყო 108.1 მჰც სიხშირეზე, ხოლო ერთი 108.5 მჰც სიხშირეზე. სამივე სანავიგაციო რადიომიმღების შემთხვევაში ILS-LOC-ის სიგნალის სიმძლავრე იყო -86 დბ/მვ.

ექსპერიმენტში სასურველი ILS-LOC სიგნალისა და არასასურველი სიგნალის მისაღებად გამოყენებული იყო R&S-ის სიგნალ-გენერატორი R&S@SMA100A შემდეგი რეჟიმებით:

- სასურველი ILS-LOC სიგნალის გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) R&S@SMA-K25,
- არასასურველი FM მაუწყებლობის სიგნალების გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) FM (Frequency Modulation).

FM მაუწყებლობის სიგნალი მოდულირებულია ფერადი ხმაურით ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის (ITU-R) რეკომენდაციის [61] მიხედვით და გააჩნდა 32 კჰც კვაზიპიკური დევიაცია, რათა მაქსიმალურად მიახლოებული ყოფილიყო რეალურ სამაუწყებლო სიგნალთან.[75,76]



ნახ. 3.3.1.1 FM-სიგნალის სპექტრული განაწილების გრაფიკები ± 32 კჰც კვაზიპიკური დევიაცია, A-გადამტანის ამპლიტუდის საბაზისო დონე, B-საშუალო ამპლიტუდა (RMS), C-პიკური ამპლიტუდა

ცხრილი 3.3.1.1 ექსპერიმენტში გამოყენებული ILS-LOC-ის და FM სამაუწყებლო სიგნალების სიხშირეები

ILS-LOC მიმღები	ILS-LOC სიხშირე (მჰც)	სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ)	f_1 (მჰც)	f_2 (მჰც)	f_3 (მჰც)
A ტიპის ILS-LOC რადიომიმღები	108.1	-86	104.1	103.7	99.7
B ტიპის ILS-LOC რადიომიმღები	108.1	-86	107.9	107.4	107.2
C ტიპის ILS-LOC რადიომიმღები	108.5	-86	107.9	107.5	106.9

ინტერმოდულაციური ხელშეშლის რისკის დასადგენად გამოიყენება მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ძირითად პრინციპს: ემთხვევა თუ არა ინტერმოდულაციური პროდუქტი სასურველი საკურსო რადიომუქურის სიხშირეს. მინიმალური FM სიგნალის სიმძლავრის დონის (დბ/მვ) დასადგენად, რომელიც საჭიროა ხელშეშლის

გამოსაწვევად, გამოიყენება პარამეტრი Δf_3 , რომელიც აჩვენებს რამდენად ახლოს არის გამოთვლილი ინტერმოდულაციური პროდუქტი სასურველ სიხშირესთან, Δf_3 , განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით [75,76]:

$$\Delta f_3(\text{მჰც}) \approx (f_{loc} - f_1) - (f_{loc} - f_2) - (f_{loc} - f_3) , \quad (3.3.1.1)$$

სადაც:

f_{loc} - არის საკურსო რადიომუქურის სიხშირე (მჰც),

f_1, f_2, f_3 - FM სიხშირეები (მჰც), რომლებიც განსხვავებული სიხშირეებია ($f_1 \neq f_2 \neq f_3$).

თუ ხელშემშლელი FM სიხშირეებია 104.1 მჰც, 103.7 მჰც და 99.7 მჰც, მესამე რიგის ინტერმოდულაციის შედეგად წარმოქმნილი ერთ-ერთი სიგნალის სიხშირე იქნება 108.1 მჰც, რაც წარმოადგენს ძლიერ ე.მ. ხელშემშლას ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებისთვის:[75]

$$f_{IMD3} = 104.1 \text{ მჰც} + 103.7 \text{ მჰც} - 99.7 \text{ მჰც}$$

$$f_{IMD3} = 207.8 \text{ მჰც} - 99.7 \text{ მჰც} \quad (3.3.1.2)$$

$$f_{IMD3} = 108.1 \text{ მჰც} ,$$

ILS-LOC რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების ტიპის ე.მ. ხელშემშლის ზეგავლენის შესაფასებლად, ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის სიგნალების ინდივიდუალური სიმძლავრის მნიშვნელობები იცვლებოდა -70 დბ/მვ-დან -20 დბ/მვ-მდე. სიგნალის სიმძლავრე ეტაპობრივად იზრდებოდა 1 დბ-იანი ბიჯებით, სანამ არ მიაღწევდა ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის სიმძლავრის ზღვრულ მნიშვნელობას.

პირველ ექსპერიმენტში ე.მ. ხელშემშლის გამომწვევი რეალური მიზეზი იყო არა რომელიმე ერთი სიგნალის დონე, არამედ მათი ჯამური ეფექტი, რომელიც აღწევდა შესაბამის ზღვრულ მნიშვნელობას I_{IMD} -ს.

ინტერმოდულაციური ხელშემშლის ზღვრული მნიშვნელობების (IMD) შეფასება განხორციელდა შემდეგი ემპირიული მოდელის საფუძველზე:

$$N_1 + N_2 + N_3 = I_{IMD}, \quad (3.3.1.3)$$

სადაც $N_1 + N_2 + N_3$ აღნიშნავს სამი FM გადამცემის სიგნალის სიმძლავრეებს დბ/მვ-ში,

I_{IMD} - წარმოადგენს პარამეტრს, რომელიც ასახავს ILS-LOC რადიომიმღების ზღვრულ მნიშვნელობას კონკრეტული სიხშირისა და ILS-LOC რადიომიმღების ტიპისთვის. ეს ნიშნავს, რომ, როდესაც სამი FM სიგნალის ჯამური სიმძლავრე აღწევს I_{IMD} -ს მნიშვნელობას, ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე აღინიშნება ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა.

ექსპერიმენტის შედეგად განისაზღვრა ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის გამოვლენის ინტერმოდულაციური სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები ILS-LOC-ის მიმღებისთვის.

დადასტურდა, რომ სხვადასხვა არქიტექტურის მქონე ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღების მდგრადობა ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლის მიმართ მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა.

ILS-LOC-ის A ტიპის რადიომიმღებისთვის (108.1 მჰც სიხშირეზე) ე.მ. ხელშეშლის ზღვარი დაფიქსირდა -60 დბ/მვ ($I_{IMD} = -60$), რაც წარმოადგენს ყველაზე მაღალ ზღვარს და შესაბამისად მიუთითებს ყველაზე ძლიერ მდგრადობაზე ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლის მიმართ.

ILS-LOC-ის B ტიპის რადიომიმღებისთვის (108.1 მჰც სიხშირეზე) ყველაზე დაბალი ზღვარი დაფიქსირდა -126 დბ/მვ ($I_{IMD} = -126$), რაც მიუთითებს ყველაზე დაბალ მდგრადობასა და ILS-LOC რადიომიმღების მაღალ მგრძობელობაზე ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლის მიმართ.

ILS-LOC-ის C ტიპის რადიომიმღებისთვის (108.5 მჰც სიხშირეზე) ე.მ. ხელშეშლის სიმძლავრის ზღვარი განისაზღვრა -112 დბ/მვ დონეზე ($I_{IMD} = -112$), რაც მიუთითებს საშუალო მდგრადობაზე. ე.მ. ხელშეშლა აღინიშნება შედარებით სუსტი ე.მ. ხელშეშლის პირობებშიც.

ცხრილი. 3.3.1.2 პირველი ექსპერიმენტის შედეგად განსაზღვრული ე.მ. ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები

ILS-LOC რადიომიმღები	სიხშირე (მჰც)	I_{IMD} მნიშვნელობა (დბ/მგ)	ე.მ. ხელშეშლის ზღვარი
A ტიპის	108.1	-60	ყველაზე მაღალი
B ტიპის	108.1	-126	ყველაზე დაბალი
C ტიპის	108.5	-112	საშუალო

3.3.2 მეორე ექსპერიმენტი: საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებზე მგრძობელობის დაქვეითების დადგენა ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედებისას

ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების დასადგენად, რომელიც იწვევს ILS-LOC რადიომიმღების მგრძობელობის დაქვეითებას (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა), ექსპერიმენტში გამოყენებულია საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) ლიცენზირებული სანავიგაციო რადიომიმღები.

საკურსო რადიოშუქურის სიგნალი ფიქსირებული იყო 108.1 მჰც-ზე, რაც წარმოადგენს სტანდარტულ სამუშაო სიხშირეს საკურსო რადიოშუქურისთვის (ILS-LOC). სასურველი სანავიგაციო სიგნალების სიმძლავრის დონე იყო -86 დბ/მგ. FM მაუწყებლობის სიგნალის სიხშირე ლაბორატორიულად იცვლებოდა Δf -ით, სადაც Δf განსაზღვრული იყო, როგორც ILS-LOC-ის სიხშირესა და FM რადიომაუწყებლობის სიხშირეს შორის სხვაობა:

$$\Delta f = f_{ILS-LOC} - f_{FM} , \quad (3.3.2.1)$$

ექსპერიმენტში სასურველი ILS-LOC სიგნალისა და არასასურველი სიგნალის მისაღებად გამოყენებული იყო R&S-ის სიგნალ-გენერატორი R&S@SMA100A შემდეგი რეჟიმებით:

- სასურველი ILS-LOC სიგნალის გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) R&S@SMA-K25,
- არასასურველი FM მაუწყებლობის სიგნალების გენერირებისათვის გამოყენებული იყო რეჟიმი (ფუნქცია) FM (Frequency Modulation).

საკურსო რადიომუქურის (ILS-LOC) სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედების განსაზღვრისათვის ხდება დაცვის თანაფარდობის გაზომვა სასურველ სანავიგაციო სიგნალისა და ხელშემშლის გამომწვევ (FM) სიგნალის სიმძლავრეებს შორის.

დაცვითი თანაფარდობა (Protection Ratio) ეს არის მიმღების შესასვლელში სასარგებლო და ხელშემშლელი (FM) სიგნალების სიმძლავრეების სხვაობა, რომელიც უზრუნველყოფს მიმღების ნორმალურ მუშაობას არასასურველი ზემოქმედების გარეშე. იგი გამოითვლება ფორმულით:

$$PR = P_D - P_I , \quad (3.3.2.2)$$

სადაც P_D არის სასარგებლო სანავიგაციო სიგნალი, ხოლო P_I ხელშემშლელი (FM) სიგნალის სიმძლავრე (დბ/მვ).

დაცვითი თანაფარდობის მნიშვნელობით განისაზღვრება ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღების ე.მ. ხელშემშლებისადმი მდგრადობა და გამოიყენება ელექტრომაგნიტური თავსებადობის შეფასებისას.

ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშემშლის ზემოქმედების შესაფასებლად ჩატარებულ ექსპერიმენტში დაცვითი თანაფარდობის განსაზღვრა ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე განხორციელდა ორი განსხვავებული სცენარით:

პირველი სცენარის შემთხვევაში FM მაუწყებლობის (ხელშემშლის) სიგნალი მოდულირდება ტელეკომუნიკაციების საერთაშორისო კავშირის რეკომენდაციაში განსაზღვრული სტანდარტების [61] შესაბამისი ფერადი ხმაურით. ამ ტიპის ხმაურის გამოყენება რეკომენდებულია ლაბორატორიულ პირობებში, რადგან მისი სპექტრული მახასიათებლები მაქსიმალურად უახლოვდება სანავიგაციო რადიომიმღების მიერ მიღებულ არასასურველ სიგნალს.

მეორე ეტაპზე, იგივე სიხშირულად მოდულირებული (FM) ხელის შემშლელი სიგნალი ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებს მიეწოდებოდა არამოდულირებულ (უწყვეტ სინუსოიდურ, (CW)) რეჟიმში. ამ ორი სხვადასხვა ტიპის მოდულაციის (მოდულირებული და არამოდულირებული) გამოყენება აუცილებელია ე.მ. ხელშემშლის წარმომავლობის მექანიზმის ღრმად შესასწავლად და მისი

კლასიფიკაციისთვის. კერძოდ, ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა დადგინდეს, რომ მიღებული ე.მ. ხელშეშლა წარმოადგენს ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითებას (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა) და არა მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილ ე.მ. ხელშეშლას (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა).

მოდულირებულ სიგნალს აქვს გვერდითი ზოლები და მას შეუძლია გამოიწვიოს როგორც მომიჯნავე არხიდან წარმოქმნილი ე.მ. ხელშეშლა (გვერდითი ზოლების მეშვეობით), ასევე ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითება. არამოდულირებულ (CW) სიგნალს კი, რომელსაც გვერდითი ზოლები არ გააჩნია, შეუძლია გამოიწვიოს მხოლოდ ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითება.

ამიტომ, თუ მოდულაციის ორივე რეჟიმში ILS-LOC-ის სანავიგაციო რადიომიმღებზე დაცვითი თანაფარდობების მნიშვნელობები თანაბარი ან მსგავსი იქნება, ეს მკაფიოდ ადასტურებს, რომ ე.მ. ხელშეშლა ნამდვილად გამოწვეულია ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითებით, ვინაიდან ამ შემთხვევაში გვერდითი ზოლების არსებობას ან არარსებობას არ აქვს გავლენა ხელშეშლის დონეზე.

თუ ე.მ ხელშეშლას იწვევს გვერდითი ზოლები, მაშინ ზოლოვანი ფილტრის გამოყენებამ უნდა გააუმჯობესოს მიმღების დაცვის თანაფარდობა, ამიტომ გაზომვები ჩატარდა როგორც ზოლოვანი ფილტრის გამოყენებით, ასევე მის გარეშე. რათა ზუსტად დაგვედგინა, რომ ხელშეშლა ნამდვილად იყო გამოწვეული ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითებით (B-2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა).

პირველი გაზომვების სერია ჩატარდა სტერეოფონული FM გადამცემის გამომავალი ფილტრით, ხოლო მეორე ფილტრის გარეშე.

სტერეოფონური ნიშნავს, რომ სიხშირული მოდულაციის (FM) რადიომაუწყებლობა გადასცემს ორ დამოუკიდებელ აუდიო არხს (მარცხენა და მარჯვენა). სტერეოსიგნალი, მონოსიგნალთან შედარებით, მოითხოვს სიხშირის უფრო ფართო ზოლის გამოყენებას და შეიცავს მეტ ინფორმაციას (მოდულაციის კომპონენტებს) საბაზისო ზოლში .ეს ნიშნავს, რომ სტერეოსიგნალი სპექტრულად უფრო რთულია და მისი გვერდითი ზოლები პოტენციურად უფრო მეტ ხმაურს იწვევს მეზობელ სიხშირეებზე, ვიდრე მარტივი მონოსიგნალი. ამდენად, ექსპერიმენტში

სტერეოსიგნალის გამოყენება უზრუნველყოფს ე.მ. ხელშემშლის ყველაზე კრიტიკული სცენარის შემოწმებას.

გადამცემის გამომავალზე განთავსებული ფილტრი გამოიყენება ხელშემშლელი სიგნალის სპექტრული სიზუსტის გაზრდისთვის. ნებისმიერი რეალური რადიოგადამცემი წარმოქმნის ძალიან დაბალი სიმძლავრის ნარჩენ ხმაურს ძირითადი გადაცემის სიხშირის ზოლის მიღმა. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ნარჩენი ხმაური ძალზე დაბალი სიმძლავრისაა, იგი ექსპერიმენტში შეიძლება იყოს შეცდომის მიზეზი.

ფილტრის გამოყენება უზრუნველყოფს, რომ ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღები აღიქვამს მხოლოდ სიგნალის მოდულირებულ კომპონენტს, ხოლო ნარჩენი ხმაური მაქსიმალურად იქნება შემცირებული. ეს საშუალებას იძლევა, რომ გაზომილ იქნეს ძალიან დაბალი დაცვითი თანაფარდობები (მაგალითად, -80 დბ/მვ-მდე) მაღალი სიზუსტით. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ნარჩენმა ხმაურმა შეიძლება ნაწილობრივ გადაფაროს სუსტი ე.მ. ხელშემშლის სიგნალები და შეამციროს მიღებული შედეგების სანდოობა.

ექსპერიმენტში გამოყენებული ზოლოვანი ფილტრის სრული გამტარი ზოლის სიგანე შეადგენდა 530 კჰც-ს -3 დბ დონეზე და 800 კჰც-ს -10 დბ დონეზე.

ფილტრის გამტარი ზოლი (530 კჰც) მკაცრად არის განსაზღვრული (ცენტრალური სიხშირიდან ზედა და ქვედა ზოლისკენ) იმისთვის, რომ მთლიანად მოიცვას FM სტერეო სიგნალის სიხშირული დიაპაზონი (≈ 200 კჰც) და მისი გვერდითი სპექტრული კომპონენტები, რაც უზრუნველყოფს სასურველი სიგნალის უცვლელად გატარებას. ამასთან, ფილტრის მაღალი შერჩევითობა აუცილებელია გადამცემის ნარჩენი სპექტრული ხმაურის ეფექტურად ჩახშობისთვის, რაც ზრდის გაზომვების სიზუსტეს.

ILS-LOC რადიომიმღების მგრძობელობის დაქვეითება (B2 ტიპის ე.მ. ხელშემშლა) არის მოვლენა, რომელიც წარმოიქმნება იმ შემთხვევებში, როდესაც ძლიერი FM სამაუწყებლო სიგნალები იწვევს ILS-LOC რადიომიმღების შესასვლელი კასკადების გადატვირთვას, რაც საბოლოოდ ამცირებს მის უნარს მიიღოს სასარგებლო სანავიგაციო სიგნალი. აღნიშნული ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშემშლის კონტროლი რთულია, ვინაიდან ხელისშემშლელი სიგნალი უკვე არსებობს და

გარკვეულ პირობებში შეიძლება ზუსტად ემთხვეოდეს საკურსო რადიომუქურისთვის (ILS-LOC) გამოყოფილ სიხშირებს [75,76].

ექსპერიმენტით განისაზღვრა დაცვითი თანაფარდობები სასურველ სანავიგაციო სიგნალის და არასასურველ სიგნალების სიმძლავრეებს შორის, რომლის დროსაც ILS-LOC რადიომიმღებზე ვლინდება მგრძნობელობის დაქვეითება (B2 ტიპის ე.მ. ხელშეშლა).[75,76]

ცხრილი 3.3.2.1 ექსპერიმენტის შედეგები ზოლოვანი ფილტრით (დეციბელებში)

Δf (კჰც)	ILS-LOC-ის A ტიპის რადიომიმღები	ILS-LOC-ის A ტიპის რადიომიმღები
	M (მოდულირებული)	N (არამოდულირებული)
0	11.5	13.0
50	-14.0	-61.0
100	-48.0	-74.0
150	-76.0	-77.0
200	-79.5	-80.0
300	-80.5	-83.0
400	-85.0	-86.0
500	-79.0	-86.0
800	-86.0	-86.0
1000	-86.0	-86.0

ცხრილი 3.3.2.2 ექსპერიმენტის შედეგები ფილტრის გარეშე (A ტიპის რადიომიმღები)

Δf (კჰც)	M (მოდულირებული)	N (არამოდულირებული)
0	8.0	10.0
50	-11.0	-22.5
100	-46.0	-57.0
150	-72.5	-73.0

200	-76.0	-76.5
300	-78.0	-77.5
400	-80.5	-80.0
500	-79.0	-83.0
800	-79.0	-85.0
1000	-81.0	-85.5

მიღებული შედეგების ანალიზი

- სიხშირული დაშორება ($\Delta f > 150$ კჰც):
ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ, როდესაც ILS-LOC სიხშირესა და FM მაუწყებლობისგან წარმოქმნილ ინტერმოდულაციურ კომპონენტს შორის სიხშირული დაშორება აღემატება 150 კჰც-ს, ორივე სიგნალის მიერ გამოწვეული ხელშეშლის დონეები პრაქტიკულად იდენტურია. ეს მიუთითებს, რომ ILS-LOC სანავიგაციო მიმღებზე დაფიქსირებულია მგრძნობელობის დაქვეითება (B2 ტიპის ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა).
- ე.მ. ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობების არარსებობა:
ექსპერიმენტულმა გაზომვებმა აჩვენა, რომ ე.მ. ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის მკვეთრი ზღვრული დონე პრაქტიკაში არ არსებობს. ე.მ. ხელშეშლის დონე არ მცირდება ერთბაშად, არამედ თანდათანობით კლებულობს სიხშირის ზრდასთან ერთად, რაც შეესაბამება ინტერმოდულაციური ზემოქმედების ბუნებას.
- ფილტრის ეფექტი:
200–300 კჰც-ზე მეტი სიხშირული დაშორებისას ზოლოვანი ფილტრის გამოყენება არსებით გავლენას აღარ ახდენს შედეგებზე, რაც მიუთითებს, რომ ამ დიაპაზონში ე.მ. ხელშეშლის სიმძლავრე უკვე მნიშვნელოვნადაა შემცირებული.
- პრაქტიკული მნიშვნელობა:
მიღებული შედეგები საშუალებას იძლევა ზუსტად განისაზღვროს ILS-LOC რადიომიმღებებზე ის მინიმალური სიხშირული დაცილება, რომლის შემდეგაც მიმღებზე მგრძნობელობის დაქვეითების ეფექტები პრაქტიკულად ქრება.[75,76]

3.4 ექსპერიმენტით გამოვლენილი ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში ინტერმოდულაციური დამახინჯების ზემოქმედება მოდულაციის ინდექსის სიდიდის ამოცნობაზე

ექსპერიმენტით გამოვლინდა ინტერმოდულაციური დამახინჯებისას (IMD), სიგნალში დამატებითი სიხშირის კომპონენტები. ეს არასასურველი სიხშირეები ცვლიან CSB-ის ეფექტურ მოდულაციის ინდექსს, რადგან ისინი შემოაქვთ არასასურველ სიგნალებს, რომლებიც ცვლიან მიღებულ A_{90} და A_{150} კომპონენტებს ან წარმოქმნიან ახალ კომპონენტებს სხვადასხვა სიხშირეზე. IMD-ს მიერ დამატებული კომპონენტები გავლენას ახდენს თავდაპირველ მოდულაციის ინდექსზე, მაგალითად, მეორე და მესამე რიგის IMD პროდუქტების შედეგად, 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის მოდულაცია შეიძლება შეიცავდეს დამატებით კომპონენტებს, IMD-ის მქონე მოდულირებული სიგნალი შეიძლება განისაზღვროს შემდეგნაირად:[75,76]

$$CSB_{IMD}(t) = A_{90}\sin(2\pi 90t) + A_{150}\sin(2\pi 150t) + A_{IMD1}\sin(2\pi f_{IMD1}t) + A_{IMD2}\sin(2\pi f_{IMD2}t) + \dots, \quad (3.4.1)$$

სადაც: f_{IMD1} , f_{IMD2} წარმოადგენს IMD სიხშირეებს, ხოლო A_{IMD1} და A_{IMD2} მათ ამპლიტუდებს. ინტერმოდულაციის შედეგად ჯამური მოდულაციის ინდექსი შეიცვლება ამ დამატებითი კომპონენტების გამო. ეს შეიძლება იყოს გამოხატული, როგორც შეცვლილი მოდულაციის ინდექსი თითოეული სანავიგაციო ტონალური სიგნალისთვის [4]:

$$M_{90}^{IMD} = \frac{A_{90} + \Delta A_{90}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}}, M_{150}^{IMD} = \frac{A_{150} + \Delta A_{150}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}}, \quad (3.4.2)$$

სადაც:

ΔA_{90}^{IMD} წარმოადგენს ამპლიტუდის ცვლილებას, რომელიც ხდება 90 ჰც სიხშირის სიგნალის ინტერმოდულაციის შედეგად ხოლო ΔA_{150}^{IMD} წარმოადგენს ამპლიტუდის ცვლილებას, რომელიც ხდება 150 ჰც სიხშირის სიგნალის ინტერმოდულაციის შედეგად [4].

ამგვარად, IMD-ის გამო მოდულაციის ინდექსის ცვლილება შეიძლება იყოს გამოხატული როგორც:

$$\Delta M_{90}^{IMD} = \frac{\Delta A_{90}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}}, \Delta M_{150}^{IMD} = \frac{\Delta A_{150}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}}, \quad (3.4.3)$$

მოდულაციის ინდექსის სხვაობა (DDM) ახლა იქნება:

$$\Delta M^{IMD} = (M_{150}^{IMD} - M_{90}^{IMD}) = \left(\frac{A_{150} + \Delta A_{150}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}} \right) - \left(\frac{A_{90} + \Delta A_{90}^{IMD}}{A_{\text{გადამტანი}}} \right), \quad (3.4.4)$$

3.4.1 ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებში ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) ზემოქმედებით საჰაერო ხომალდის მდებარეობის კოორდინაციის დარღვევა

მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა (DDM) პირდაპირ კავშირშია საჰაერო ხომალდის ჰორიზონტალურ პოზიციასთან ა.დ.ზ.-ის ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით:

$$\text{საჰაერო ხომალდის მდებარეობა} = K \times \Delta M, \quad (3.4.1.1)$$

სადაც K არის მასშტაბირების ფაქტორი, რომელიც დამოკიდებულია სისტემის გეომეტრიასა და ILS-LOC-ის კონკრეტულ კონფიგურაციაზე. საკურსო რადიოშუქურისთვის $k \approx 61$ მეტრი ერთეულ DDM-ზე, რაც ნიშნავს, რომ ყოველ 0.1 ერთეული DDM ცვლილებაზე საჰაერო ხომალდი დაახლოებით 6.1 მეტრით გადადის მარცხნივ ან მარჯვნივ ა.დ.ზ.-ის ცენტრალური ხაზიდან [4].

როდესაც IMD გავლენას ახდენს მოდულაციის ინდექსზე, შედეგად მიიღება არაზუსტი მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა (ΔM^{IMD}) [75,76]

$$\Delta M^{IMD} = \Delta M + \Delta M_{\text{შეცდომა}}, \quad (3.4.1.2)$$

ეს ნიშნავს, რომ ILS-LOC-ის მიერ განსაზღვრული საჰაერო ხომალდის ჰორიზონტალური პოზიცია ახლა შეიცავს კომპონენტებს, რომლებიც იწვევენ შეცდომებს:

$$\text{პოზიცია } IMD = K \times (\Delta M + \Delta M_{\text{შეცდომა}}), \quad (3.4.1.3)$$

საჰაერო ხომალდის დაშვების პროცესში, ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) შედეგად, მოდულაციის ინდექსის ასიმეტრიულმა დარღვევამ შეიძლება გამოიწვიოს მოდულაციის ინდექსის სხვაობის (DDM) არასწორი მნიშვნელობები, რაც, თავის მხრივ, საჰაერო ხომალდის პოზიციის არასწორ ინტერპრეტაციას იწვევს [4].

- თუ IMD იწვევს 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალის (რომელიც დაკავშირებულია საკურსო რადიოშუქურის მარჯვენა მხარესთან) ზრდას, საჰაერო ხომალდმა შესაძლოა თავისი პოზიცია ზედმეტად გადახრილად აღიქვას ა.დ.ზ.-ის ცენტრალური ხაზიდან, რის გამოც, მფრინავი მარცხენა მიმართულებით შეეცდება კორექტირებას [4].
- მეორე მხრივ, თუ IMD ზრდის 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალს (რომელიც დაკავშირებულია საკურსო რადიოშუქურის მარცხენა მხარესთან), საჰაერო ხომალდმა შესაძლოა თავი ზედმეტად მარჯვნივ აღიქვას, რის გამოც, მფრინავი მარჯვნივ შესწორებას შეეცდება. [75,76]

ინტერმოდულაციური დამახინჯების კომპონენტების ამპლიტუდა და სიხშირე, ისევე როგორც მათი ურთიერთქმედება თავდაპირველ სიგნალთან, საბოლოოდ განსაზღვრავს ამ ეფექტის გავლენის ინტენსივობას. IMD-ის გავლენა მოდულაციის ინდექსზე შეიძლება აღიწეროს, როგორც DDM-ის ცვლილება, რაც, საბოლოოდ, საჰაერო ხომალდის გადახრას იწვევს.

ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) ეფექტების უფრო დეტალურად შესასწავლად, განვიხილოთ საკურსო რადიოშუქურა (ILS-LOC), რომელიც გადასცემს ორ ძირითად სანავიგაციო ტონალურ სიგნალს:

- 90 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი, რომელიც შეესაბამება საკურსო რადიოშუქურის სხივის მარცხენა მხარეს (ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით).
- 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალი, რომელიც შეესაბამება საკურსო რადიოშუქურის სხივის მარჯვენა მხარეს (ცენტრალურ ხაზთან მიმართებით მარჯვნივ).

იდეალურ სისტემაში, სადაც IMD არ არის, ამ სანავიგაციო ტონალური სიგნალების მოდულაციის ინდექსები არიან:

$$M_{90} = 0.20, M_{150} = 0.30, \quad (3.4.1.4)$$

მოდულაციის ინდექსთა შორის სხვაობა (DDM), რომელიც განსაზღვრავს საჰაერო ხომალდის პოზიციას, განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:[75,76]

$$\Delta M = M_{150} - M_{90} = 0.30 - 0.20 = 0.10, \quad (3.4.1.5)$$

საკურსო რადიოშუქურის (ILS-LOC) რადიომიმღებში DDM-ის მნიშვნელობა პირდაპირ უკავშირდება საჰაერო ხომალდის პოზიციას მასშტაბირების ფაქტორის K მეშვეობით, რომელიც დამოკიდებულია სისტემის გეომეტრიასა და კონფიგურაციაზე. მასშტაბირების ფაქტორი K საკურსო რადიოშუქურის სისტემისთვის განსაზღვრულია და ტოლია 61 მეტრის თითოეულ DDM ერთეულზე. აღნიშნული ფაქტორი ასახავს, რამდენი მეტრით გადაადგილდება საჰაერო ხომალდი ა.დ.ზ-ის ცენტრალური ხაზიდან მარჯვნივ ან მარცხნივ, როდესაც DDM-ის მნიშვნელობა ერთით იცვლება. ამ პირობებში საჰაერო ხომალდის პოზიცია გამოითვლება შემდეგნაირად:[75,76]

$$\text{პოზიცია} = K \times \Delta M = 61 \times 0.10 = 6,1 \text{ მეტრი}, \quad (3.4.1.6)$$

ეს იდეალური სცენარია. თუმცა, IMD-ის არსებობის შემთხვევაში, 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის კომპონენტების მოდულაციის ინდექსები იცვლება, რაც იწვევს DDM-ის არასწორ ფუნქციონირებას და, შედეგად, საჰაერო ხომალდის პოზიციის არასწორ განსაზღვრას. IMD-ის ეფექტების ზუსტი მათემატიკური მოდელირება მოითხოვს იმ სპექტრული კომპონენტების გათვალისწინებას, რომლებიც წარმოიქმნება მეორე და მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებების შედეგად [4,75,76].

ინტერმოდულაციური დამახინჯება (IMD) წარმოქმნის არასასურველ სიხშირულ კომპონენტებს, რაც გავლენას ახდენს 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის მამოდულირებელ სანავიგაციო ტონალურ სიგნალებზე.

როდესაც IMD-ის შედეგად ხდება შემდეგი ამპლიტუდური ცვლილებები:

$\Delta A_{90}^{IMD}=0.02$ (დამატებითი ამპლიტუდა ინტერმოდულაციის გამო),
 $\Delta A_{150}^{IMD} = -0.01$ (ამპლიტუდის შემცირება ინტერმოდულაციის გამო).
 ეს ცვლილებები გარდაქმნის მოდულაციის ინდექსს შემდეგნაირად:

$$M_{90}^{IMD} = \frac{A_{90} + \Delta A_{90}^{IMD}}{A_a} = \frac{0.20 + 0.02}{1.0} = 0.22 \quad (3.4.1.7)$$

$$M_{150}^{IMD} = \frac{A_{150} + \Delta A_{150}^{IMD}}{A_a} = \frac{0.30 - 0.01}{1.0} = 0.29, \quad (3.4.1.8)$$

სადაც A_a წარმოადგენს გადამტანი სიგნალის ამპლიტუდას, რომელიც გამოიყენება მოდულაციის ინდექსის გამოთვლაში. M_{90}^{IMD} და M_{150}^{IMD} არის მოდულაციის ინდექსი, რომელიც განახლებულია მონაცემების გათვალისწინებით, სადაც A_{90} და A_{150} არის შესაბამისი სიგნალების ამპლიტუდები, ხოლო ΔA_{150}^{IMD} და ΔA_{90}^{IMD} წარმოადგენს ამპლიტუდების ცვლილებებს ინტერმოდულაციის (IMD) შედეგად. შესაბამისად, ახალი მოდულაციის ინდექსებს შორის სხვაობის (DDM) მნიშვნელობა გახდება:[75,76]

$$\Delta M^{IMD} = M_{150}^{IMD} - M_{90}^{IMD} = 0.29 - 0.22 = 0.07, \quad (3.4.1.9)$$

იგივე მასშტაბირების კოეფიციენტის $K = 61$ (მეტრი თითო DDM ერთეულზე) გამოყენებით, ILS-LOC-ის სანავიგაციო რადიომიმღების მიერ განსაზღვრული საჰაერო ხომალდის პოზიცია ა.დ.ზ - ის ცენტრალური ხაზის მიმართ იქნება:[75,76]

$$\text{პოზიცია}^{IMD} = K \times \Delta M^{IMD} = 61 \times 0.07 = 4.27 \text{ მეტრი}, \quad (3.4.1.10)$$

ამგვარად, ნაცვლად იმისა, რომ ILS-LOC რადიომიმღებმა საჰაერო ხომალდის პოზიცია ცენტრალური ხაზიდან 6.10 მეტრით მარჯვნივ აღიქვას, იგი აღიქვამს მხოლოდ 4.27 მეტრით მარჯვნივ, რაც ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) შედეგად 1.83 მეტრის პოზიციურ შეცდომას იწვევს. აღნიშნული განსხვავება საჰაერო ხომალდის პოზიციაში წარმოიქმნება ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების შედეგად [4].

IMD-ის ეფექტის უკეთ საჩვენებლად, ანალიზს საჭიროებს მოდულაციის ინდექსის ცვლილებები:

- IMD-ის გარეშე: $\Delta M = 0.10$,
- IMD-ით: $\Delta M_{IMD} = 0.07$.

ინტერმოდულაციური დამახინჯებით გამოწვეული შეცდომა იქნება:

$$\Delta M_{შეცდომა} = \Delta M - \Delta M_{IMD} = 0.10 - 0.07 = 0.03, \quad (3.4.1.11)$$

სადაც ΔM წარმოადგენს მოდულაციის ინდექსის განსაზღვრისას წარმოქმნილ შეცდომას, ხოლო ΔM_{IMD} მოდულაციის ინდექსის ცვლილებას, რომელიც ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD) ეფექტით არის გამოწვეული. აღნიშნული დამოკიდებულება მიუთითებს, რომ IMD-ის ზემოქმედების შედეგად მოდულაციის ინდექსში წარმოქმნილი მცირე გადახრებიც კი საკმარისია პოზიციის განსაზღვრისას მნიშვნელოვანი შეცდომის წარმოსაქმნელად, რაც საბოლოოდ გავლენას ახდენს საჰაერო ხომალდის ტრაექტორიაზე.[75,76]

3.4.2 ინტერმოდულაციური დამახინჯების ზემოქმედებით სასურველი სანავიგაციო სიგნალის ფაზისა და ამპლიტუდის ცვლილებები

თუ მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტი ცვლის 90 ჰც და 150 ჰც სიხშირის სანავიგაციო ტონალური სიგნალების ფაზას, შესაძლებელია მთლიანი სიგნალის გამოსახვა, როგორც: [75,76]

$$S_{IMD}(t) = S_{CSB}(t) + S_{SBO}(t), \quad (3.4.2.1)$$

სადაც ინტერმოდულაციური დამახინჯება ახდენს ზემოქმედებას როგორც ამპლიტუდაზე, ასევე ფაზაზე, რაც უარყოფითად აისახება აღნიშნული ორი სანავიგაციო ტონალური სიგნალის ჯამითა და სხვაობით წარმოქმნილ კომპონენტებზე.

ფაზაში მყოფი კომპონენტები (ცენტრალური ხაზის მარჯვენა მხარეს) გავლენას განიცდიან ინტერმოდულაციური პროდუქტებიდან და თუ ეს არასასურველი ტონები ფაზის გადაადგილებას გამოიწვევენ, ამან შეიძლება გამოიწვიოს არასწორი დამატებითი (საჭიროზე მეტი) მოდულაცია, რაც გამოიწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის არასწორ ჩვენებებს.

ფაზაში წანაცვლებული კომპონენტების (ცენტრალური ხაზის მარცხენა მხარეს) არასწორმა ფაზურმა გადანაცვლებამ შესაძლოა გამოიწვიოს კურსიდან გადახრის მაჩვენებელზე არასწორი სანავიგაციო მითითებები. ეს განპირობებულია იმით, რომ

სანავიგაციო ტონალური სიგნალები ცენტრალური ხაზის კონკრეტულ მხარეს ერთმანეთს ემატება იმ შემთხვევაში, როდესაც ისინი ფაზაშია, ხოლო უქმდება მაშინ, როდესაც მათ შორის ფაზის საპირისპირო დამოკიდებულება არსებობს.[75,76]

ინტერმოდულაციური სიგნალის ზემოქმედების შედეგად სანავიგაციო ტონალური სიგნალების ფაზის გადაადგილება იწვევს შეცდომებს ჯამისა და სხვაობის ოპერაციების შესრულებისას. ასეთ პირობებში სიგნალები შესაძლოა სრულად არ გაუქმდეს იმ უბნებში, სადაც მათ შორის საპირისპირო ფაზა უნდა არსებობდეს. შედეგად, საკურსო რადიოშუქურის სანავიგაციო ინფორმაცია რადიომიმღების მიერ მცდარად აღიქმება, რაც კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის არასწორ ჩვენებას განაპირობებს.

პრაქტიკაში, ინტერმოდულაციურ დამახინჯებას სანავიგაციო რადიომიმღებში შეუძლია გამოიწვიოს:

1. ყალბი გადახრის მითითება ა.დ.ზ.- ის მიმართ: საჰაერო ხომალდმა შეიძლება მიიღოს არასწორი სიგნალები, რაც მფრინავს აფიქრებინებს, რომ იგი ცენტრალური ხაზის მარცხნივ ან მარჯვნივ იმყოფება, მაშინ, როდესაც ეს ასე არ არის.
2. გამაფრთხილებელი ალმის გააქტიურება: ILS-LOC რადიომიმღების გამაფრთხილებელი ალმის გააქტიურება და სიგნალის სრული დაკარგვა, მაშინაც კი, როდესაც რადიოგადამცემიდან გამოგზავნილი სიგნალი სწორი და მკაფიოა [22].

მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯება (IMD3) წარმოადგენს ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებისთვის ყველაზე კრიტიკულ ე.მ. ხელშეშლას.

ინტერმოდულაციური კომპონენტი წარმოიქმნება უშუალოდ ILS-LOC რადიომიმღების შიგნით, მაღალი სიმძლავრის არასასურველი სიგნალების არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგად. წარმოქმნილი ინტერმოდულაციური სიგნალი სიხშირით ზუსტად ემთხვევა ILS-LOC რადიომიმღების სამუშაო არხს, რის შედეგადაც სისტემა ვერ ახერხებს მის გაფილტვრას და ნამდვილი სანავიგაციო სიგნალისგან გარჩევას. IMD3-ის კომპონენტი გადის ფილტრაციისა და სიგნალის დამუშავების ყველა ეტაპს ისე, თითქოს სასარგებლო სანავიგაციო ტონი იყოს, რაც იწვევს კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის ცრუ გადახრას. ამ მიზეზების გამო, IMD3 წარმოადგენს

ყველაზე სახიფათო ტიპის ე.მ. ხელშეშლას, რომლის მიმართაც ILS-LOC რადიომიმღებს ფიზიკურად არ გააჩნია დაცვის საშუალება.[76,75]

3.5 ILS-LOC სანავიგაციო მიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების შედეგობრივი კლასიფიკაცია [75,76]

ე.მ. ხელშეშლების კლასიფიკაცია ზემოქმედების სიმძიმის მიხედვით

კრიტიკული სიმძიმის მიხედვით: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), რომელიც პირდაპირ გავლენას ახდენს სანავიგაციო სიგნალების მთლიანობასა და სიზუსტეზე, იწვევს უსაფრთხოების პოტენციურ საფრთხეებს საჰაერო ხომალდის ფრენის დროს. ეს შეიძლება მოიცავდეს სიგნალის სრულ დაკარგვას ან მნიშვნელოვან გადახრებს სანავიგაციო გეგმიდან.[75,76]

ზომიერი სიმძიმის მიხედვით: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), რომელიც იწვევს სანავიგაციო სიგნალების პერიოდულ შეფერხებებს ან მცირე გადახრებს, მოითხოვს მფრინავების ყურადღებას კურსის სიზუსტის შესანარჩუნებლად, მაგრამ არ წარმოადგენს უშუალო საფრთხეს უსაფრთხოებისთვის.

უმნიშვნელო სიმძიმის მიხედვით: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლისას (EMI), რომელსაც აქვს მინიმალური ან შეუმჩნეველი გავლენა სანავიგაციო სისტემების მუშაობაზე, სანავიგაციო სიგნალები რჩება მისაღები ტოლერანტობის ფარგლებში უსაფრთხო მუშაობისთვის [4,75,76].

კლასიფიკაცია ზემოქმედების ხანგრძლივობის მიხედვით

გარდამავალი: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლისას (EMI), რომელიც ჩნდება გარკვეული დროის მონაკვეთში, ხშირად გარე ფაქტორების გამო, როგორცაა ახლომდებარე ელექტრონული მოწყობილობები ან ატმოსფერული პირობები შეფერხებები, როგორც წესი, სწრაფად წყდება და შეიძლება არ მოითხოვოს დაუყოვნებელი მოქმედება.[75,76]

წყვეტილი: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), რომელიც ხდება არარეგულარული ინტერვალებით, დროთა განმავლობაში იწვევს სანავიგაციო სიგნალების განმეორებით

შეფერხებებს. ამ შეფერხებებს შეიძლება დასჭირდეს პერიოდული მონიტორინგი და პრევენციული ზომების გატარება სისტემის მუდმივი საიმედოობის უზრუნველსაყოფად.[75,76]

უწყვეტი: ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), რომელიც გრძელდება დიდი ხნის განმავლობაში უწყვეტად, მუდმივად მოქმედებს სანავიგაციო სისტემების მუშაობაზე.

კლასიფიკაცია სივრცითი განაწილების მიხედვით:

ლოკალიზებული ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), გავლენას ახდენს სანავიგაციო სისტემების დაფარვის კვალდაკვალ კონკრეტულ უბნებსა ან რეგიონებზე, როგორცაა ახლომდებარე ელექტრონული აღჭურვილობის ან რადიოგადამცემების მიერ გამოწვეული ხელშეშლა. ლოკალიზებული ხელშეშლა შეიძლება შემცირდეს ანტენის განლაგების კორექტირებით ან დამცავი ზომების განხორციელებით.[75]

ფართოდ გავრცელებული ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI), რომელიც ვრცელდება უფრო დიდ გეოგრაფიულ ტერიტორიებზე, გავლენას ახდენს მრავალ სანავიგაციო სისტემაზე ან თვითმფრინავზე მოცემულ საჰაერო სივრცეში. ფართომასშტაბიანმა ხელშეშლამ შეიძლება მოითხოვოს კოორდინირებული ძალისხმევა მარეგულირებელ ორგანოებს შორის, საჰაერო სივრცის მომხმარებლებსა და ინფრასტრუქტურის ოპერატორებს შორის [4,75,76].

კლასიფიკაცია აღმოჩენის სიხშირის და პერიოდულობის მიხედვით:

იშვიათი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლა (EMI) არის ზემოქმედებები, რომლებიც ხდება იშვიათად ან გამონაკლის გარემოებებში, როგორებიცაა იშვიათი ატმოსფერული მოვლენები. მიუხედავად იმისა, რომ იშვიათია, ამ მოვლენებს შესაძლოა მაინც ჰქონდეს მნიშვნელოვანი შედეგები და მოითხოვოს კონკრეტული მოქმედებები ხელშეშლების შერბილებისთვის.[75]

პერიოდული ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების (EMI) ზემოქმედებები, ხდება პერიოდულად ან კონკრეტულ პირობებში, მაგალითად, განზრახ ან შემთხვევითი ხელშეშლა ან ელექტრომაგნიტური გამოსხივების წყაროებთან სიახლოვის შემთხვევებში.

ხშირი ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის მოვლენები, რომლებიც ხდება რეგულარულად ან თანმიმდევრულად, მიუთითებს ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის მუდმივ წყაროებზე ან ტექნიკურ და სისტემურ პრობლემებზე, რომლებიც საჭიროებენ მუდმივ ყურადღებას და პერიოდულ მონიტორინგს სანავიგაციო სისტემის მუშაობის შესანარჩუნებლად [4,75,76].

3.6 ILS-LOC რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლების ზემოქმედების განეიტრალების მიზნით კვლევის შედეგობრივი რეკომენდაციები

რეკომენდაცია 1: ელექტრომაგნიტური თავსებადობის რეგულირების გაუმჯობესება ეროვნულ დონეზე.

ჩატარებული კვლევის შედეგად გამოვლენილი პოტენციური რისკებიდან გამომდინარე, რეკომენდებულია, რომ ეროვნულ დონეზე, შესაბამისმა მარეგულირებელმა ორგანოებმა შეიმუშაონ და დაამტკიცონ ტექნიკური რეგლამენტი. ეს რეგლამენტი მკაცრად დაარეგულირებს FM მაუწყებლობის სადგურების განთავსებას ILS-LOC-ის სიახლოვეს ან იმ ტერიტორიაზე, რომლის რადიოსიგნალის გავრცელების ზონა მოიცავს სანავიგაციო სისტემის სამუშაო არეალს.

ახალი რეგლამენტი უნდა ითვალისწინებდეს ამ კვლევის შედეგებს და მოიცავდეს შემდეგ მოთხოვნებს:

- 1. მინიმალური გეოგრაფიული დაშორებები** ILS-LOC-ის ანტენებიდან, რაც გაითვალისწინებს FM გადამცემების გამოსხივებულ სიმძლავრეს, ანტენის დიაგრამასა და რელიეფის თავისებურებებს.
- 2. ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (EMC) სიმულაციების ჩატარება**, როგორც სავალდებულო მოთხოვნა ახალი FM სადგურების მშენებლობისას ან არსებულის სიმძლავრის გაზრდისას, რათა წინასწარ დადგინდეს პოტენციური ხელშეშლის დონე.

3. რადიომონიტორინგის განხორციელება იმ შემთხვევებში, თუკი ე.მ. თავსებადობასთან (EMC) დაკავშირებული მოდელირებები მაღალ რისკებზე მიუთითებს, რათა სრულად გამოირიცხოს საავიაციო უსაფრთხოებისათვის საშიში პირობები.

ICAO-ს მიერ დადგენილი პერიოდული საფრენოსნო და სახმელეთო შემოწმებების გარდა, ამ რეგულაციების დანერგვა უზრუნველყოფს, რომ განხორციელდეს მუდმივი მონიტორინგი და კონტროლი, რაც მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს საავიაციო უსაფრთხოებას და შეამცირებს ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების, კერძოდ კი ინტერმოდულაციური ზემოქმედების არასასურველ გავლენას სანავიგაციო ILS-LOC-ის რადიომიმღებზე.

რეკომენდაცია 2: FM მაუწყებლობის გადამცემების სიმძლავრის კონტროლი და რადიოსპექტრის მუდმივი მონიტორინგი.

კვლევის შედეგად გამოვლენილი ინტერმოდულაციური ე.მ. ხელშეშლის რისკების გათვალისწინებით, რეკომენდებულია შემდეგი ღონისძიებების შემუშავება და დანერგვა:

- FM მაუწყებლობის სიმძლავრის რეგულირება: დაწესდეს სიმძლავრის ზედა ზღვარი FM მაუწყებლობისთვის ILS-LOC სისტემის მგრძნობიარე ზონაში. ამ ე.მ. ხელშეშლის ზღვრის დასადგენად აუცილებელია რადიომონიტორინგის ჩატარება, ხოლო მის მეთოდოლოგიად შესაძლებელია გამოყენებული იყოს სადისერტაციო ნაშრომში შემოთავაზებული მეთოდოლოგია. ეს მიდგომა მნიშვნელოვნად შეამცირებს ელექტრომაგნიტური ე.მ. ხელშეშლის რისკს, განსაკუთრებით იმ პირობებში, როდესაც მესამე რიგის ინტერმოდულაციური პროდუქტები პირდაპირ ILS-LOC-ის სიხშირულ ზოლში წარმოიქმნება.
- რადიოსიხშირული სპექტრის მუდმივი მონიტორინგი და კონტროლი: შემუშავდეს და დაინერგოს სპექტრის მონიტორინგის გეგმა, რომელიც მოიცავს როგორც ILS-LOC-ის სიხშირული ზოლის, ასევე FM მაუწყებლობის სპექტრული ინტენსივობისა და სიმძლავრის დონის მუდმივ კონტროლს. მონიტორინგის ჩატარების მეთოდოლოგია და მიღებული შედეგები უნდა აკმაყოფილებდეს საერთაშორისო სამოქალაქო ავიაციის ორგანიზაციის (ICAO) მე-10 დანართის (Annex 10)

მოთხოვნებს. მონიტორინგის შედეგები უნდა გაიცვალოს შესაბამის უწყებებს შორის ეროვნულ დონეზე და გამოყენებული იყოს როგორც წინასწარი გამაფრთხილებელი მექანიზმი ელექტრომაგნიტური ე.მ. ხელშემშლის აღმოჩენის შემთხვევაში.

ეს მიდგომა უზრუნველყოფს, რომ საავიაციო უსაფრთხოების ფუნდამენტური საერთაშორისო სტანდარტების (ICAO) დაცვის პარალელურად, განხორციელდეს უფრო დეტალური და დინამიკური კონტროლი ადგილობრივ დონეზე, რაც დაიცავს სანავიგაციო სისტემას პოტენციური საფრთხეებისგან.

რეკომენდაცია 3: ILS-LOC-ის მიმღებების მდგრადობის გაზრდა.

კვლევის შედეგად გამოვლენილი ინტერმოდულაციური ეფექტების კრიტიკული ხასიათის გათვალისწინებით, რეკომენდებულია, ILS-LOC რადიომიმღების ახალი არქიტექტურის დიზაინის შემუშავება, განსაკუთრებით კი მიმღების პირველი კასკადისთვის (Front End). ეს დიზაინი უნდა უზრუნველყოფდეს უკეთეს შერჩევითობას და არაწრფივი კომპონენტების ეფექტური ჩახშობის უნარს. ამ მიდგომით მიიღწევა გაუმჯობესებული შერჩევითობა და მიმღების არაწრფივი მახასიათებლების ზემოქმედების ჩახშობა.

საუკეთესო საშუალებაა ახალი თაობის სანავიგაციო მიმღებების დაფუძნება პროგრამულად განსაზღვრულ რადიოზე (SDR). ეს ტექნოლოგია უზრუნველყოფს მოქნილობას და საშუალებას იძლევა, რომ მიმღების ფუნქციონალი პროგრამულად შეიცვალოს და გაუმჯობესდეს. ამ კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები გამოყენებულ უნდა იქნეს მიმღების ალგორითმის საფუძვლის შესაქმნელად, რომელიც პასუხისმგებელი იქნება მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ხელშემშლის იდენტიფიცირებასა და ეფექტურ აღმოფხვრაზე.

მესამე თავის დასკვნა

მათემატიკური სცენარების მოდელირებისას გამოყენებულია ტრიგონომეტრიული ანალიზი და მოდულაციის თეორია, სადაც ILS-LOC სისტემის სასარგებლო სიგნალები CSB და SBO წარმოდგენილია როგორც ჰარმონიული კოსინუსების კომბინაცია. აღნიშნული მიდგომა საშუალებას იძლევა, "სუფთა"

სანავიგაციო ტონალური სიგნალის სტრუქტურაში მათემატიკურად მოხდეს ინტერმოდულაციური კომპონენტის ეფსილონის ინტეგრირება. ამ გზით დგინდება, თუ რა ცვლილებებს განიცდის ჯამური სიგნალის ამპლიტუდა და ფაზა ხელშეშლის ზემოქმედებით, რაც თეორიულ დამახინჯებას გარდასახავს რეალურ დროით მახასიათებელში და ქმნის საიმედო საფუძველს შემდგომი ექსპერიმენტალური გაანგარიშებებისთვის.

ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების დასადგენად შემუშავებულია ე.მ. ხელშეშლის ზემოქმედების მათემატიკური სცენარები და შესრულებულია ორი იმიტაციური ექსპერიმენტი, რომელთაგან ერთით განსაზღვრულია მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯებისას სანავიგაციო რადიომიმღებზე ე.მ. ხელშეშლის ზღვრული მნიშვნელობები, ხოლო მეორე ექსპერიმენტით დადგენილია მესამე რიგის ინტერმოდულაციური ზემოქმედებისას სასურველ სანავიგაციო სიგნალის სიმძლავრისა და არასასურველი სიგნალის სიმძლავრეს შორის ის დაცვითი თანაფარდობები, რომელთა დარღვევის შემთხვევაში ხდება ILS-LOC რადიომიმღების მგრძნობელობის დაქვეითება.

ექსპერიმენტულმა გაზომვებმა აჩვენა, რომ ე.მ. ხელშეშლის მკვეთრი ზღვრული დონე პრაქტიკაში არ არსებობს. ჩარევის დონე არ მცირდება ერთბაშად, არამედ თანდათანობით კლებულობს სიხშირის ზრდასთან ერთად, რაც შეესაბამება ინტერმოდულაციური ზემოქმედების ბუნებას.

ძირითადი დასკვნები:

სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია ILS-LOC სისტემის კონცეპტუალური მოდელი და დეტალურადაა გაანალიზებული ILS-LOC რადიოგადამცემის მიერ სივრცითი მოდულაციის წარმოქმნის მექანიზმი საჰაერო ხომალდის კოორდინაციისათვის. კვლევის ძირითადი ნაწილი ეძღვნება სანავიგაციო

რადიომიმღებზე მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების (IMD3) ზემოქმედების შესწავლას.

სადისერტაციო ნაშრომში შემუშავებულია მესამე რიგის ინტერმოდულაციური დამახინჯების ზეგავლენის მათემატიკური მოდელები და შესაბამისი სცენარები. აღნიშნული მიდგომის სიახლე მდგომარეობს თეორიული არაწრფივობის მახასიათებლების და საავიაციო სანავიგაციო პარამეტრების გაერთიანებაში, რაც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს საჰაერო ხომალდის ILS-LOC რადიომიმღების კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის სიდიდე კონკრეტული ე.მ. ხელშეშლის პირობებში.

ნაშრომში განსაზღვრულია და ექსპერიმენტულად დადგენილია, რომ ინტერმოდულაციური კომპონენტი წარმოიქმნება უშუალოდ ILS-LOC რადიომიმღების შიგნით, მაღალი სიმძლავრის არასასურველი სიგნალების არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგად, და წარმოადგენს ყველაზე კრიტიკულ ე.მ. ხელშეშლას, რომლის მიმართაც ILS-LOC რადიომიმღებს ფიზიკურად არ გააჩნია ეფექტური დაცვის მექანიზმი.

ინტერმოდულაციური სიგნალი სიხშირით ემთხვევა ILS-LOC რადიომიმღების სამუშაო არხს, რის გამოც სისტემა ვერ ახერხებს მის გაფილტვრასა და ნამდვილი სანავიგაციო სიგნალისგან გარჩევას. შედეგად, მესამე რიგის ინტერმოდულაციური კომპონენტი გადის სიგნალის დამუშავების ყველა ეტაპს ისე, თითქოს სასარგებლო სანავიგაციო ტონალური სიგნალი იყოს, რაც იწვევს საჰაერო ხომალდის ILS-LOC რადიომიმღების კურსიდან გადახრის მაჩვენებლის (CDI) არასწორ ფუნქციონირებას.

კვლევის შედეგად განისაზღვრა საჰაერო ხომალდის ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლის სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები და სასურველი და არასასურველი სიგნალების სიმძლავრეებს შორის დაცვითი თანაფარდობები. ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე შემუშავებულია ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების შედეგობრივი კლასიფიკაცია და პრაქტიკული რეკომენდაციები საჰაერო ხომალდების უსაფრთხო დაფრენის უზრუნველსაყოფად.

კვლევის შედეგები ქმნის მყარ საფუძველს ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების აღმოჩენისა და პროგნოზირების ალგორითმების შემუშავებისთვის, განსაკუთრებით

პროგრამულად განსაზღვრული რადიო (SDR) ტექნოლოგიების გამოყენებით ILS-LOC სანავიგაციო რადიომიმღებების გაუმჯობესების კონტექსტში.

მიღებული დასკვნები ადასტურებს, რომ ILS-LOC რადიომიმღების უსაფრთხო ფუნქციონირების უზრუნველსაყოფად აუცილებელია ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზეგავლენის უწყვეტი მონიტორინგი და კვლევა, განსაკუთრებით აეროდრომებთან ახლოს მაღალი სიმძლავრის FM რადიოგადამცემების არსებობის პირობებში.

ნაშრომის აპრობაცია და გამოქვეყნებული პუბლიკაციები:

კვლევის შედეგები წარმოდგენილ იქნა ფართო სამეცნიერო საზოგადოების წინაშე ოთხ საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე თბილისსა და ანკარაში (თურქეთის რესპუბლიკა), კერძოდ:

- საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია, 16-17 ივნისი, 2025 წ. თბილისი, საქართველო;
- საერთაშორისო საინჟინრო კონფერენცია „ICOE-25”, 29–30 აპრილი, 2025 წელი, ანკარა, თურქეთი;
- საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია, 17-19 ივნისი, 2024 წ. თბილისი, საქართველო;
- საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის სტუდენტთა XV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 8-9 ივნისი 2022 წ. თბილისი, საქართველო.

პუბლიკაციები: დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო ნაშრომი და 5 მოხსენებათა თეზისი, მათ შორის, მაღალრეიტინგულ, ციტირებად და რეფერირებად ჟურნალებში.

კვლევის პროცესში რეალური მონაცემების დამუშავებისა და გათვალისწინების მიზნით, განხორციელდა ინტენსიური ვიზიტები ადგილობრივ დონეზე „საქაერონავიგაციაში“, საზღვარგარეთ, ჩეხეთის რესპუბლიკაში ქალაქ ბრნოს თავდაცვის უნივერსიტეტის რადიონავიგაციის ლაბორატორიაში ერთი კვირის განმავლობაში, სადაც ჩატარდა რადიომონიტორინგის ექსპერიმენტული გაზომვები.

ნაშრომის მოცულობა: დისერტაცია შედგება შესავლის, მიმოხილვითი თავის, ძირითადი ნაწილის - მეორე და მესამე თავი, დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. იგი მოიცავს 146 გვერდს და ლიტერატურა არის 74 დასახელების.

გამოყენებული ლიტერატურა:

ქართულენოვანი ლიტერატურა

1. თ. ქორთუა. (2018). *სატელეკომუნიკაციო სიხშირული სპექტრის მართვისა და რეგულირების საფუძვლები (9 kHz–300 GHz) სიხშირულ დიაპაზონებში*. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. ISBN 978-9941-28-405-2 (PDF).
2. ს. ტეფნაძე, რ. ებრალიძე, ნ. თიკანაშვილი. (2018). *საჰაერო რადიონავიგაციის საფუძვლები*. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი.
3. ს. ტეფნაძე, რ. ებრალიძე, გ. ნიკოლაიშვილი. (2013). *BOEING-737 საჰაერო ხომალდის საბორტო რადიოსანავიგაციო სისტემები*. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი.
4. თ. ქორთუა, რ. კუჭუხიძე (2024). ხმოვანი რადიომაუწყებლობის სერვისიდან (87.5-108 MHz) გენერირებული ინტერმოდულაციური სიგნალების ზემოქმედების გავლენის კვლევა საჰაერო ხომალდის აერონავტიკულ ILS-LOC რადიოსანავიგაციო მიმღებზე. *საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი «საჰაერო ტრანსპორტი»*, 1(18).
5. საავიაციო ტერმინთა სასწავლო ილუსტრირებული ქართულ-ინგლისური ლექსიკონი, საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, თბილისი, 2023.

ინგლისურენოვანი ლიტერატურა

6. International Telecommunication Union, "Compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87-108 MHz and the aeronautical services in the band 108-137 MHz", Rec. ITU-R SM.1009-1, 2018.
7. International Telecommunication Union, "Test procedures for measuring aeronautical receiver characteristics used for determining compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87-108 MHz and the aeronautical services in the band 108-118 MHz", Rec. ITU-R SM.1140-0, 2019.
8. National Transportation Safety Board, "Group chairman's factual report: Operational factors (DCA19FA089)", Office of Aviation Safety, Washington, D.C., December 22, 2021.
9. International Civil Aviation Organization. *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Radio Navigation Aids*. 8th ed. Montreal: ICAO, 2023. ISBN 978-92-92-9275-173-9.
10. Zhang X., Luo Z., Kang G., "Analysis and research on the interference of civil aviation radio navigation equipment", *Journal of Physics*, 2022; vol. 7, p. 2–4.

11. Titze H. G., "VOR/ILS Receiver Tests using the Signal Generator SMT", Application Note 1GPAN09E, Rohde & Schwarz, 2016.
12. Rahim B. F., Breuer P., "Aeronautical radio navigation measurement solutions", Application Note 1MA193_0e, Rohde & Schwarz, 2011.
13. Al-Shamary H., Salman T. M., Lecture Notes on Communication Engineering, 2023.
14. Tutorials Point, "Analog communication course", Accessed February 4, 2024. https://www.tutorialspoint.com/analog_communication/index.htm.
15. Rohde & Schwarz, "Modulation and signal generation with R&S® signal generators: Educational note", Version 13, Document No. 1178.5995.02, 2016.
16. Art of NAVAID's, "ILS Concepts for electronics technicians", YouTube, February 19, 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=8VymS1-D0mQ>.
17. TESBL Aerospace, "CSB or SBO in Glideslope and Localizer – Part of TESBL ILS System", May 11, 2022.
18. Santos R. B. de A. V., "Impact of FM broadcast signals on aeronautical radionavigation", Master's thesis, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2015.
19. Saxena S., "Instrument Landing System (ILS)", Department of Electronics and Communication Engineering, Northern India Engineering College, New Delhi, India, 2016.
20. Rodrigues S. A., "Design of an ILS localizer for the new Montijo Airport", Instituto Superior Técnico, Portugal, 2019.
21. CAE Oxford Aviation Academy, Radio navigation – ATPL Ground Training Series. Singapore: KHL Printing Co. Pte Ltd., 2014.
22. Kortua T., Kutchukhidze R., *"The impact of intermodulation distortion (IMD) on aeronautical ILS radio navigation receivers"*, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2024; vol. 18, № 4.
23. Weldon J. A., "A direction finding system using log periodic dipole antennas in a sparsely sampled linear array", Master's thesis, Wright State University, Dayton, USA, 2010.
24. Poljak D., Doric V., Birkie M., Kosor D., "Analysis of log-periodic dipole arrays with boundary elements", *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 2008; vol. 47, p. 75–84.

25. Rajendran J., Sundaram G. A. S., "Design and evaluation of printed log periodic dipole antenna for L band electrically steerable array system", 1st International Conference on Computational Systems and Communications, Trivandrum, India, December 2014.
26. Balanis C. A., *Antenna Theory – Analysis and Design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
27. Mattsson M., *Intermodulation distortion in active and passive components*. Department of Microtechnology and Nanoscience - MC2, Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden: Chalmers Reproservice, 2023.
28. Wilkerson J. R., Gard K. G., Schuchinsky A. G., Steer M. B., "Electro-thermal theory of intermodulation distortion in lossy microwave components", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008; vol. 56, № 12, p. 2717–2725.
29. Iliev T. B., Stoyanov I. S., Mihaylov G. Y., Ivanova E. P., "Study the influence of intermodulation products on navigation signals", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021; vol. 1032, p. 012013.
30. Lloyd G., "Linearity measurements on RFFE components", Rohde & Schwarz Application note 1MA299_1e, 2017.
31. Ramian F., "Intermodulation distortion measurements on modern spectrum analyzers", Rohde & Schwarz Application note 1EF79_2Ete, 2012.
32. ITU, *Final acts of the Regional Administrative Conference for the Planning of VHF Sound Broadcasting*. Public Report. Geneva, Switzerland: ITU, 1984.
33. Kuchukhidze R., Kortua T., "Electromagnetic Interference Impact of VOR, ILS, and GBAS Radio Navigation Systems Operating in the VHF Band ", *Air Transport*, ISSN 1512-4916, vol. 16, no. 1. 2022.
34. International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), "Transmission standards for FM sound broadcasting at VHF", Recommendation ITU-R BS.450-3. ITU, 2001.
35. Andreas, "Snow effects on ILS signal propagation", *Engineering Pilot*, February 14, 2023. <https://www.engineeringpilot.com/post/snow-effects-on-ils-signal-propagation>.
36. Kerr D. E., *Propagation of short radio waves*. London, England: Peter Peregrinus Ltd., 1987.

37. Haslett C., *Essentials of radio wave propagation*. New York: Cambridge University Press, 2008.
38. Sakai J., Saito S., Hosokawa K., Tomizawa I., "Anomalous propagation of radio waves from distant ILS localizers due to ionospheric sporadic-E", Department of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-Communications, Chofu, Japan.
39. Saito S., Hosokawa K., Sakai J., Tomizawa I., "Anomalous long-distance propagation of ILS LOC signals by the Es layer and its impact on aviation receivers", Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Chofu, Japan, 2023.
40. Leuchter J., Bloudicek R., *"Influence of aircraft power electronics processing on backup VHF radio systems"*, *Electronics*, 2021; vol. 27.
41. Leuchter J., Steklý V., Blasch E., *"Investigation of avionics power switch loading versus aircraft electromagnetic compatibility"*, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015; vol. 30, № 1, p. 24–34.
42. RTCA, "DO-160C Environmental conditions and test procedures for airborne equipment", Accessed October 26, 2020. <https://do160.org/rtca-do-160g/>.
43. Kimoto T., Cooper A. J., *Fundamentals of silicon carbide technology: Growth, characterization, devices and applications*. 1st ed. Wiley-IEEE Press, 2014.
44. Tooley M., Wyatt D., *Aircraft electrical and electronic systems: Principles, maintenance and operation*. England, UK: Routledge, 2009.
45. EUROCONTROL, "Eurocontrol experimental centre: RVSM and TCAS in European airspace", Accessed January 14, 2021. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/010_RVSM_and_TCAS_in_European_Airspace.pdf.
46. Dzunda M., Dzurovcin P., Koscak P., Semrad K., "Impact of Interference on DME Operations", Proceedings of the 2019 Modern Safety Technologies in Transportation (MOSATT), 2019, p. 49–52.
47. Geisc R., Neubauer B., Zimmer G., "Scaled measurements of multipath propagation and navigation systems—A practical example for ILS", Proceedings of the 2019 Joint

- International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC), 2019, p. 482–485.
48. Sathaye H., Schepers D., Ranganathan A., Noubir G., "Wireless Attacks on Aircraft Instrument Landing Systems", 28th USENIX Security Symposium (USENIX Security 19), Santa Clara, CA, August 2019.
 49. Boeing, Statistical summary of commercial jet airplanes accidents. 55th ed. 2023.
 50. Binns C., Aircraft Systems: Instruments, Communications, Navigation, and Control. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2018.
 51. EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines on 8.33 kHz Channel Spacing for Military Operators. Edition 2.0. Reference nr: EUROCONTROL-GUID-174. July 5, 2018.
 52. International Civil Aviation Organization, Aeronautical Communications Panel, Working Group F, "Meeting Report", Nairobi, February 20–27, 2004.
 53. Balanis C. A., Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
 54. Kutchukhidze R., Kortua T., "*Review Analysis of the Intermodulation Distortion (IMD) on the Instrument Landing System (ILS)*", *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 2025; vol. 10, № 47s.
 55. ITU-R, "Frequency and Distance Separations", Recommendation SM.337-6. Geneva: International Telecommunication Union, October 2008.
 56. Fernandes C. A., Aspects of Propagation in the Atmosphere. Support text for the Radiopropagation course. Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, 2002.
 57. Hysell D. L., Larsen M. F., Carlson H. C., "*Ionospheric Electric Field Estimates from Radar Observations of the Equatorial Electrojet*", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999; vol. 104, № A1, p. 153–159.
 58. Zare F., Kumar D., Lungeanu M., Andreas A., "Electromagnetic Interference Issues of Power Electronics Systems with Wide Band Gap Semiconductor Devices", Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, September 20–24, 2015, p. 5946–5951.

59. Dzunda M., Dzurovcin P., Koscak P., Semrad K., "Impact of Interference on DME Operations", Proceedings of the 2019 Modern Safety Technologies in Transportation (MOSATT), Kosice, Slovakia, November 28–29, 2019, p. 49–52.
60. Geisc R., Neubauer B., Zimmer G., "Scaled Measurements of Multipath Propagation and Navigation Systems—A Practical Example for ILS", Proceedings of the 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC), Sapporo, Japan, June 3–7, 2019, p. 482–485.
61. International Telecommunication Union, "Radio-Frequency Protection Ratios for MF, LF, and HF Broadcasting", Recommendation ITU-R BS.559-2. Geneva: ITU, 2002.
62. International Telecommunication Union, "Determination of Radio-Frequency Protection Ratios for Frequency Modulated Sound Broadcasting", Recommendation ITU-R BS.641. Geneva: ITU, 2002.
63. International Civil Aviation Organization, Manual on testing of radio navigation aids: Volume I - Testing of ground-based radio navigation systems. 4th ed. Doc 8071-AN/902. 2019.
64. RTCA, "Minimum operational performance standards for airborne ILS localizer receiving equipment operating within the radio frequency range of 108–112 MHz", Doc. No. DO 195. November 17, 1986.
65. International Civil Aviation Organization, *Frequency Spectrum Management Panel (FSMP), Fifth Working Group Meeting, Paris, France, 4–8 September 2017*, ATMRPP-WG/WHL/x-IP/06.
66. Shitu R., *Analyzing Interference on Aviation Instrument Landing System from Frequency Modulated Broadcasting Systems: the Case of Bole International Airport*, M.Sc. Thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Addis Ababa, Ethiopia, June 2018.
67. European Commission. *Guide for the EMC Directive 2004/108/EC*. Brussels: European Commission, February 8, 2010. Ref. Ares (2015)1692637 - 21/04/2015.

68. Verified Market Reports. *Instrument Landing System Market: Global Instrument Landing System Market Size By Technology, Application, Component, End-User, Service Type, Geographic Scope and Forecast*. Report ID: 806796. February 2025.
69. Skrypnik O. N., *Radio Navigation Systems for Airports and Airways*, Springer Aerospace Technology, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, 2019. Library of Congress Control Number: 2019934521. ISBN 978-981-13-7200-1. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7201-8>
70. Market Research Future (MRFR), *Instrument Landing System Market Research Report*, ID: MRFR/IA-E/21327-HCR, Snehal Singh, September 2025.
71. International Civil Aviation Organization. Handbook on Radio Frequency Spectrum Requirements for Civil Aviation. Volume II: Frequency Assignment Planning Criteria for Aeronautical Radio Communication and Navigation Systems. 2nd ed. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2022. Doc 9718.
72. Teschler L., *Basics of Deciphering Electromagnetic Interference*. Design World, February 24, 2020.
73. International Telecommunication Union. Regional Administrative Conference for FM Sound Broadcasting in the VHF Band (Region 1 and Certain Countries Concerned in Region 3), First Session, Geneva, 1982: Report to the Second Session of the Conference (See Resolution A). Geneva: General Secretariat of the International Telecommunication Union, 1982.
74. International Telecommunication Union. *XVIIth Plenary Assembly, Düsseldorf, 1990: Compatibility between the Broadcasting Service in the Band of About 87–108 MHz and the Aeronautical Services in the Band 108–137 MHz*. Geneva: International Telecommunication Union, 1990.
75. რამინი კუჭუხიძე. აეროპორტების ზონაში რადიოსანავიგაციო სისტემებზე ელექტრომაგნიტური ხელშეშლების ზემოქმედების კვლევა საჰაერო ხომალდების დაფრენის უსაფრთხოების გაუმჯობესების მიზნით

76. რამინი კუჭუხიძე. აეროპორტების ზონაში ელექტრომაგნიტურ ხელშეშლათა ზემოქმედების კვლევა თვითმფრინავის რადიოსანავიგაციო სისტემებზე საჰაერო ხომალდის დაფრენის გასაუმჯობესებლად