

აირტურბინულ ძრავებში შემავალი უცხო სხეულების (ნაწილაკების) აღმოჩენა და იდენტიფიკაცია OFDM - MIMO ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადარული სისტემით

თეიმურაზ ქორთუა¹, ანდრო მაისურაძე²

^{1, 2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

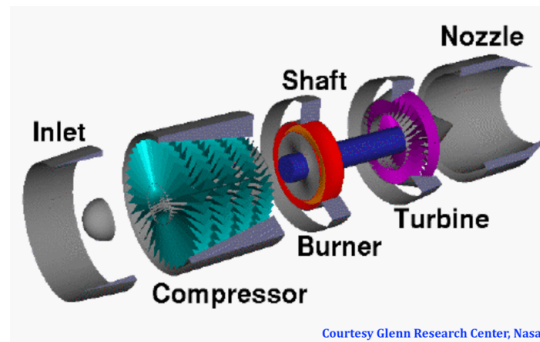
ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: თვითმფრინავების აირტურბინული ძრავები მგრძნობიარეა მათ გამდინარე ნაწილში მოხვედრილი უცხო სხეულების მიმართ, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ძრავის სერიოზული დაზიანება ან ეფექტურობის დაკარგვა[1]. ასეთი ობიექტების რეალურ დროში აღმოსაჩენად და მათი იდენტიფიკაციისთვის ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას წარმოადგენს OFDM – MIMO [4] ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადარული სისტემის გამოყენება. საჭიროა რადარული სისტემის აგება, რომელსაც შეუძლია ფუნქციონირება მაღალი დიაპაზონის გარჩევადობით, დოპლერის მგრძნობელობით და მრავალმხრივი არეკვლის, ხმაურის და ვიბრაციის მიმართ მდგრადობით; ისეთი ექსტრემალურმა პირობებმა (როგორიც არის: ჰაერის ნაკადის მაღალი სიჩქარე, ტემპერატურა, ტენიანობა) შესაძლებელია გავლენა მოახდინოს ისეთ მნიშვნელოვან პარამეტრზე, როგორიც არის რადარის ტალღის დაფარვის ზედაპირი (RCS).

საკვანძო სიტყვები: რადარი, მიმღები, (OFDM) ორთოგონალური სიხშირული გაყოფის მულტიპლექსირება, (MIMO) მრავალი შემავალი და გამომავალი სიგნალი, გადაცემის მრავალფეროვნება.

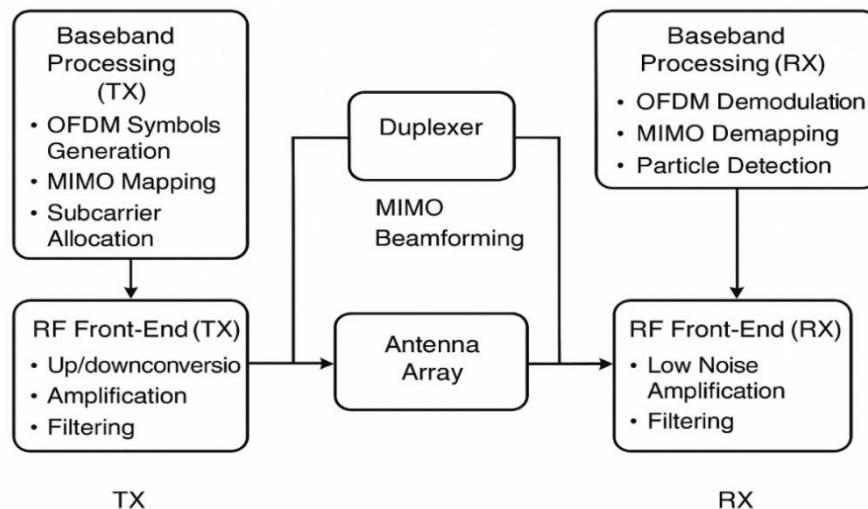
შესავალი

წარმოდგენილი კვლევა ეყრდნობა MIMO-OFDM რადარის სისტემის შემუშავებას, რომელიც გამოიყენებს ე.წ. ალამუტის სივრცით-დროის კოდირებას, რათა მიღწეულ იქნას უცხო სხეულების აღმოჩენის სიზუსტე, მათი გარჩევის საიმედოობა და მიმღების მაღალი მგრძნობელობა, შედარებით გამარტივებული დიზაინით. სისტემა უნდა განთავსდეს საჰაერო ხომალდის აირტურბინული ძრავის ჰაერმიმღებ მოწყობილობებში.



სურ. 1 აირტურბინული ძრავა

სისტემა თავდაპირველად უნდა მუშაობდეს მხოლოდ რადარის რეჟიმში, ორმაგი ფუნქციის მქონე რადარის კომუნიკაციის (DFRC) შემდგომი განვითარებადი პლატფორმით და გაფართოების პოტენციალით. უცხო სხეულების (ნაწილაკების) აღმოჩენის სისტემა დაფუძნებულია რადარების აგების ახალ ტექნოლოგიაზე და არქიტექტურაზე, რომელიც იყენებს **MIMO** –(Multiple-input and multiple-output) და **OFDM**-(Orthogonal frequency-division multiplexing) ტექნოლოგიებს[4], რათა უზრუნველყოს ერთდროული გადაცემა და მიღება ორ ანტენაზე. სისტემის საერთო ზოგადი ბლოკ-სქემა შედგება ხუთი ძირითადი ფუნქციური ბლოკისგან: საბაზისო დამუშავების ბლოკი (TX), RF წინა მხარე, დუპლექსორი, ანტენის მასივი და საბაზისო დამუშავების ბლოკი (RX). სურ. 2.



სურ. 2 რადარული სისტემის საერთო ბლოკ-დიაგრამა

1. TX საბაზისო გადამცემი და მონაცემთა დამუშავების ბლოკი:

ეს ბლოკი წარმოქმნის OFDM სიმბოლოებს და ასრულებს ქვეგადამტანის განაწილებას ნაწილაკის აღმოჩენის ამოცანის მოთხოვნების შესაბამისად. ის იყენებს MIMO -ს კოდირებული სიგნალების მრავალ სივრცულ გადაცემის ფენაზე გასანაწილებლად, რაც უზრუნველყოფს

პარალელური ზონდირების შესაძლებლობას და აუმჯობესებს ნაწილაკების აღმოჩენის სივრცულ გარჩევადობას.

2. RF წინა მხარე (TX/RX):

RF წინა მხარე ახორციელებს საბაზისო სიგნალის აღმავალ გარდაქმნას დანიშნულ გადამტან სიხშირეზე გადაცემისთვის და დაღმავალ გარდაქმნას მიღებისთვის. ის მოიცავს სიმძლავრის გამამდიერებლებს (PA) და დაბალი ხმაურის გამამდიერებლებს (LNA) სიგნალის მაღალი მთლიანობის შესანარჩუნებლად, ზოლის გამტარობის ფილტრებთან ერთად არასასურველი ჰარმონიკების და ინტერმოდულაციის დამახინჯების (IMD) ჩასახშობად.

3. დუბლექსორი:

სიხშირის შერჩევითი ქსელი ჰყოფს გადაცემის გზებს, ხოლო საერთო ანტენის გამოყენება უზრუნველყოფს საჭირო გადაცემის იზოლაციას და მინიმუმამდე ამცირებს შეერთებას, მაღალი გადაცემის სიმძლავრეს და არ ამახინჯებს მიმღების გზას.

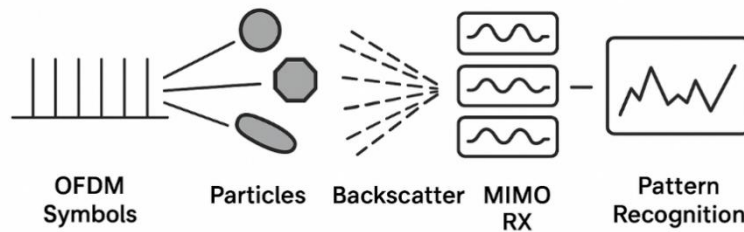
4. ანტენის მასივი (MIMO):

ანტენის სტრუქტურა საშუალებას იძლევა სივრცითი მულტიპლექსირების MIMO ტექნიკის მეშვეობით. ეს საშუალებას იძლევა სიგნალის მიმართულებით გადაცემისა და მიღებისა, რაც ზრდის აღმოჩენის სიზუსტეს და საშუალებას აძლევს სისტემას განახსევავოს ნაწილაკები სხვადასხვა სივრცითი წარმოშობიდან.

5. RX მიმღების საბაზისო დამუშავების ბლოკი:

MIMO-დან მიღებული სიგნალი გადის OFDM დემოდულაციას და დემოდულირებას მონაცემების მრავალი სივრცითი და სიხშირული არხიდან აღსადგენად. ალგორითმები ამუშავებენ აღდგენილ სიგნალებს ნაწილაკების რეალურ დროში იდენტიფიცირების, დათვლისა და კლასიფიკაციის მიზნით სიგნალის ამპლიტუდის, ფაზის ვარიაციის და დროის დომენის საფუძველზე. შეჯამებისთვის, შემოთავაზებული სისტემის არქიტექტურა აერთიანებს მოწინავე საბაზისო დამუშავებას, MIMO სხივის ფორმირებას და OFDM მულტიპლექსირებას ერთიან გადამცემ-მიმღების სტრუქტურაში. ეს MIMO + OFDM ვარიანტი ძალიან საინტერესოა და ტექნიკურად უფრო ძლიერი მიდგომაა, განსაკუთრებით სხვადასხვა სახის ნაწილაკების აღმოჩენისა და პარალელური სიგნალების აღქმისთვის. სურ. 3

Signal Interaction and Detection Principle



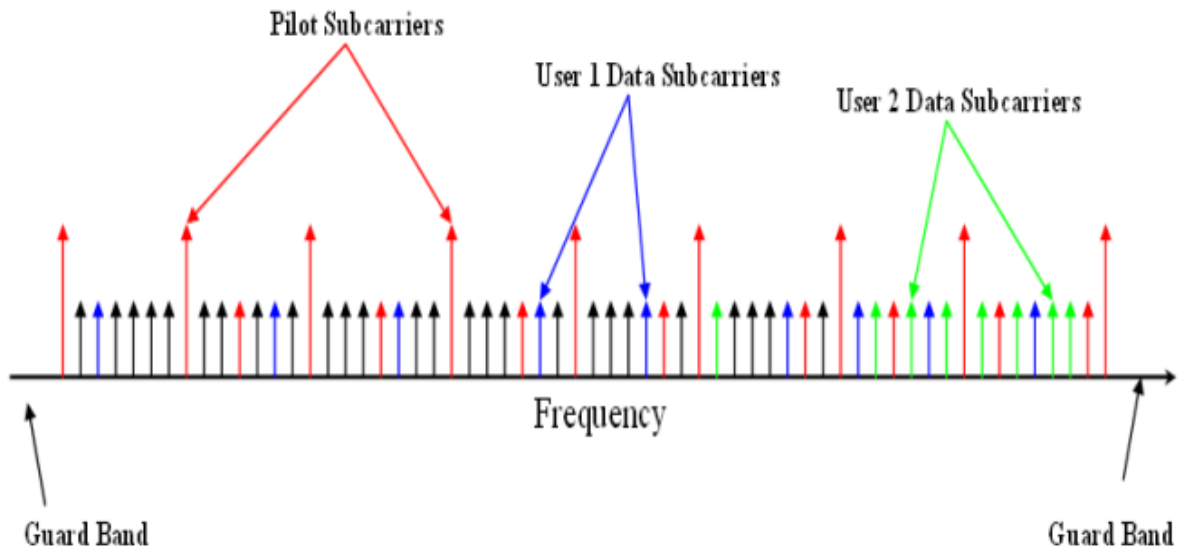
სურ. 3 სიგნალის ურთიერთქმედება და აღმოჩენის პრინციპი

ძირითადი ნაწილი

რადარების განვითარების ტექნოლოგიები და OFDM-ის გამოყენების თეორიული საფუძვლები[2,3,5]:

მულტიპლექსირება სიხშირეთა ორთოგონალური დაყოფით (OFDM) არის ციფრული მოდულაციის ტექნიკა, რომელიც იყენებს მრავალ ორთოგონალურ ქვეგადამტანებს და ატარებს მონაცემებს დაბალი სიმბოლოების სიჩქარით, რომელიც ხელს უშლის ქვეგადამტანებს შორის ნებისმიერ ჩარევას.

მულტიპლექსინგი სიხშირული დაყოფით (FDM) არის ტექნიკა, სადაც გადასაცემი მთავარი სიგნალი გადაიცემა დაყოფილი დამოუკიდებელი სიგნალების ერთობლიობად, რომლებიც ცნობილია როგორც ქვეგადამტანები სიხშირეთა დომენში. ამრიგად, ორიგინალი მონაცემთა ნაკადი იყოფა მრავალ პარალელურ ნაკადად (ან არხად), თეორიულად რაც შესაძლებელია, თითოეული ქვეგადამტანებისთვის. ამ ქვეგადამტანების თითოეული ნაწილი შემდეგ მოდულირდება ჩვეულებრივი მოდულაციის სქემით და გაერთიანებულია FDM სიგნალის გენერირებისთვის.



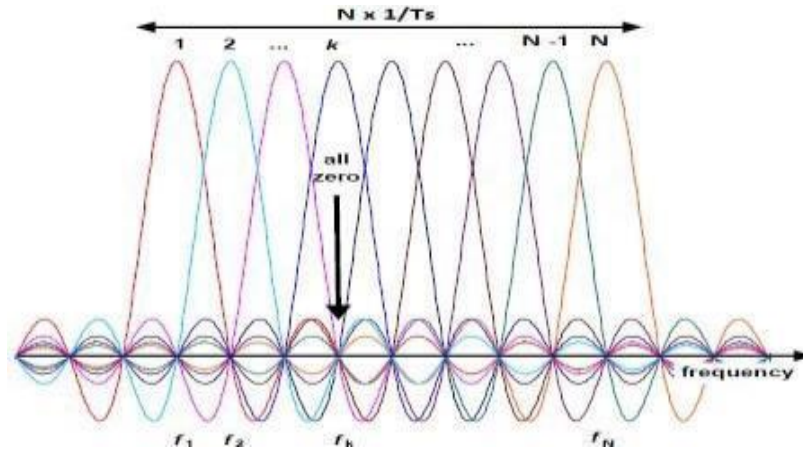
სურ. 4 OFDM სიხშირის სპექტრი დაცვის ზოლებით

სურ. 4 გვიჩვენებს მოცემულ OFDM სიხშირის სპექტრს დაცვის ზოლებით, პილოტური ქვეგადამტანებით და მომხმარებლის მონაცემთა ქვეგადამტანებით. მრავალი ქვეგადამტანის გადაცემას კონკრეტულ გამტარობაზე. იმის გამო, რომ OFDM სიგნალებს შეუძლიათ ეფექტურად გადაცემა დიდ გამტარობაზე, შესაძლებელია მაღალი დიაპაზონის გარჩევადობის მიღწევა, რაც საჭიროა თვითმფრინავის აირტურბინულ ძრავში მიხვედრილი სხეულების დეტალური ამოცნობისთვის.

თუმცა, FDM გადაცემის თითოეული ქვეგადამტანი სიხშირე დამოუკიდებლად აღდგება მიმღებზე და ამიტომ, ეს სიგნალები უნდა აკმაყოფილებდეს გარკვეულ პირობებს ორთოგონალურობის მისაღწევად, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ.1-ზე. მაგალითად, მათ შეიძლება ჰქონდეთ არაგადამფარავი სპექტრები, რათა ფილტრებმა, რომლებიც მორგებულია სხვადასხვა ქვეგადამტანებზე, შეძლონ თითოეული მათგანის დამოუკიდებლად აღდგენა. ეფექტურობის მისაღწევად, პრაქტიკულ ფილტრებში ქვეგადამტან ზოლებს შორის იქმნება დამცავი ზოლი. თუ ქვეგადამტანი სიგნალები აკმაყოფილებენ ორთოგონალურობის პირობას, მათი სპექტრი შეიძლება გადაფაროს, რითაც გაუმჯობესდება სპექტრული ეფექტურობა. ეს ტექნიკა ცნობილია როგორც ორთოგონალური FDM ან OFDM.

შემდეგ, როგორც ნაჩვენებია სურ 5-ში, OFDM სიმბოლოების სპექტრი შედგება გადამფარავი sinc ფუნქციებისგან, რომელთაგან თითოეული წარმოადგენს ქვემატარებელს, სადაც k -ურ ქვემატარებლის სიხშირეზე ყველა სხვა ქვემატარებელს აქვს ნულები. გასათვალისწინებელია, რომ თითოეული ქვემატარებელი ცენტრირებულია fk -ზე და გამოყოფილია ინტერვალით $1/T_s$ -ით მისი მეზობლებისგან. როდესაც ეს ხდება, ორთოგონალურობის პირობა სრულდება, ამიტომ გადაცემისთვის მიიღწევა მაღალი სპექტრული ეფექტურობა. ამ გზით, ქვეგადამტანების აღდგენა შესაძლებელია მიმღებზე გადამტანებს შორის ჩარევის გარეშე, სიგნალის ძლიერი სპექტრული

გადაფარვის მიუხედავად, ორთოგონალურობის პირობის საშუალებით, ოსცილატორების ბანკის და თითოეული ქვეგადამტანის დაბალი გამტარობის ფილტრაციის გამოყენებით.



სურ. 5 OFDM სიმბოლოს სპექტრი გადაფარული ქვეგადამტანებით

OFDM ქვეგადამტანების და ქვეზოლებს შორის ორთოგონალურობის პრინციპი:

სიტყვა „ორთოგონალური“ მიუთითებს, რომ სისტემაში გადამტან სიხშირეებს შორის არსებობს ზუსტი მათემატიკური კავშირი. ნორმალურ სიხშირული დაყოფის მულტი-პლექსურ სისტემაში, ბევრი გადამტანი სიხშირე ისეა დაშორებული, რომ სიგნალების მიღება შესაძლებელია ჩვეულებრივი ფილტრებისა და დემოდულატორების გამოყენებით.

ასეთ მიმდებარეში, დამცავი ზოლები შემოდის სხვადასხვა გადამტან სიხშირის დომენში, რაც იწვევს სპექტრის ეფექტურობის შემცირებას. თუმცა, შესაძლებელია OFDM სიგნალში გადამტან სიხშირეთა ისე განლაგება, რომ ცალკეული გადამტანების გვერდითი ზოლები გადაფარონ და სიგნალები მაინც მიიღონ მიმდებარე გადამტანების ჩარევის გარეშე. ამისათვის გადამტანი სიხშირეები მათემატიკურად ორთოგონალური უნდა იყვნენ ერთმანეთის მიმართ. თუმცა, მრავალგადამტანიანი მოდულაციის (MCM) გადაცემული სიგნალები, $s(t)$ შეგვიძლია წარმოვადგინოთ შემდეგნაირად:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{sc}} C_{ki} S_{ki}(t - iT_s)$$

$$S_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t}$$
(1)

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases},$$
(2)

სადაც; C_{ki} წარმოადგენს k -ური ქვემატარებლის i -ურ საინფორმაციო სიმბოლოს, S_{ki} წარმოადგენს k -ური ქვემატარებლის ტალღის ფორმას, N_{sc} წარმოადგენს ქვეგადამტანების

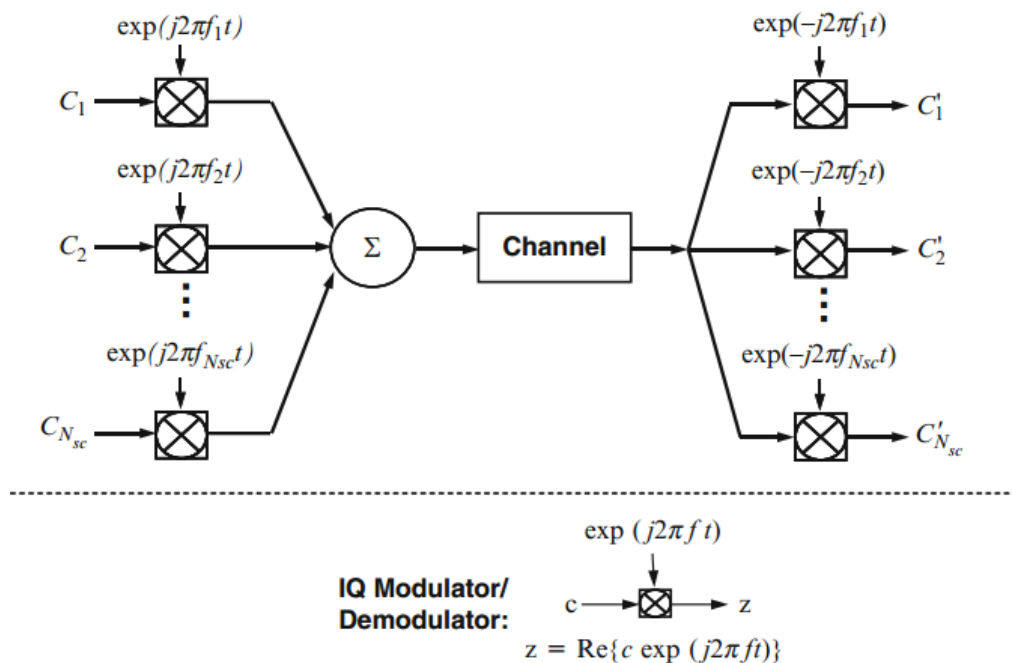
რაოდენობას, f_k წარმოადგენს ქვეგადამტანს სიხშირეს, T_s წარმოადგენს სიმბოლოს პერიოდს და ბოლოს, $\Pi(t)$ წარმოადგენს იმპულსის ფორმირების ფუნქციას. თუმცა, თითოეული ქვემატარებელი ოპტიმალური აღმოჩენის მისაღწევად შეიძლება გამოიყენოს ფილტრი, რომელიც შეესაბამება ქვემატარებლის ტალღის ფორმას, ან კორელატორი, რომელიც შეესაბამება ქვემატარებელს, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ 6-ზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მიმღებზე აღმოჩენილი საინფორმაციო სიმბოლო C_{ik} მოცემულია შემდეგნაირად:

$$C'_{ik} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s^* k dt$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt$$

(3)

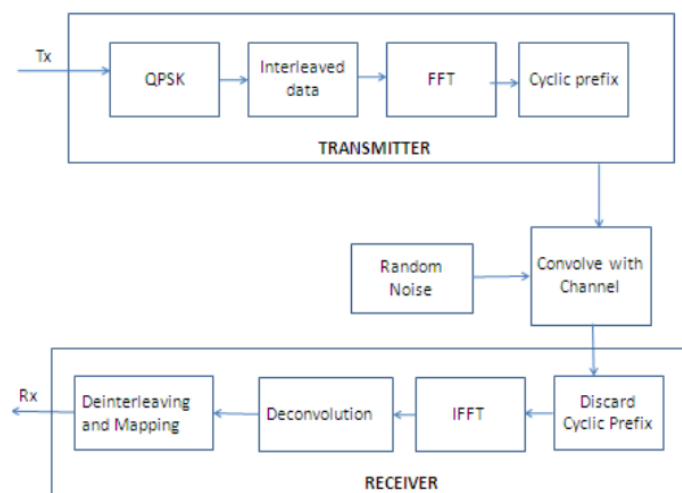
სადაც $r(t)$ წარმოადგენს მიღებულ დროის დომენის სიგნალს.



სურ. 6. მოდულაციის სისტემა მრავალი გადამტანით (MCM)

მრავალი გადამტანით მოდულაციის სისტემა MCM იყენებს არაგადაფარულ, შეზღუდული დიაპაზონის სიგნალებს, მისი დანერგვა გულისხმობს ოსცილატორებისა და ფილტრების დიდი რაოდენობას გადამცემსა და მიმღებზე. მიუხედავად იმისა, რომ მისი თანდაყოლილი უპირატესობებით, MCM-ის ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა ის არის, რომ ის მოითხოვს დიდ გამტარობას. OFDM მოდულაციის გამოყენებით, მაღალი სპექტრული ეფექტურობის გარდა, გამოიყენება მრავალჯერადი შემავალი, მრავალჯერადი გამოშვავალი (MIMO) ანტენა-მასივი.

ამგვარ MIMO რადარულ სისტემებს აქვთ რამდენიმე უპირატესობა, ძირითადად სივრცითი გარჩევადობის გაუმჯობესების და კუთხური არეკვლის შეფასების ფორმირების გამოყენების შესაძლებლობა, რაც აუცილებელია მრავში მიხვედრილი სხეულების დეტალური ამოცნობისთვის. OFDM სიგნალის გადაცემისას, აუცილებელია, რომ ქვეგადამტანი სიხშირეები დარჩნენ ორთოგონალურები და არ ერეოდნენ ერთმანეთში. აქ გამოყენებულია MIMO ალამუტის მეთოდები, რომელიც არის სივრცულ-დროით ბლოკური კოდირების ტექნიკა, რომელიც გამოიყენება მონაცემთა საიმედოობისა და გადაცემის სიჩქარის გასაუმჯობესებლად. ყველაზე გავრცელებული მეთოდი იყენებს ორ გადამცემ ანტენას და ერთ ან მეტ მიმღებ ანტენას ერთი და იგივე მონაცემების გასაგზავნად ისე, რომ გამოყენებული იყოს სივრცითი მრავალფეროვნება, რაც მიმღებს საშუალებას აძლევს ზუსტად გაშიფროს სიგნალი, ალამუტის ძირითადი სქემა ახორციელებს კოდირებას მონაცემთა ორი სიმბოლოთი, მათი სპეციალური ნიმუშით გადაცემით ორ ანტენაზე ორ დროით სლოტზე, გადაცემის ორთოგონალურობის მისაღწევად. ამასთან ერთად OFDM-ზე სხივური ფორმირების გამოყენებით შესაძლებელი ხდება OFDM სიგნალის ენერგიის კონკრეტული მიმართულებით ფოკუსირება. დიაპაზონის, დოპლერის ეფექტის და კუთხის შეფასების შესრულება სამიზნე პოზიციების ზუსტი შეფასების საშუალებას იძლევა, რაც კიდევ უფრო გაუმჯობესებულია სხივური ფორმირებით.



სურ. 7 OFDM ბლოკ-სქემა

OFDM გადამცემი სიგნალის გენერირებისთვის, რომელთაგან თითოეული შეიცავს N ქვემატარებელს გადაცემისთვის, ციფრული ბიტური ნაკადი გარდაიქმნება მოდულაციის სქემად, როგორიცაა კვადრატულ ფაზური მანიპულაცია (QPSK) ან კვადრატულ ამპლიტუდური მოდულაცია (QAM). ამ მიზნით გამოვიყენეთ 16-QAM, რომელიც უზრუნველყოფს უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტურობას, ვიდრე QPSK, სიმბოლოზე 4 ბიტის გადაცემით 2-ის ნაცვლად.

ალამუტის დეკოდირების სქემა

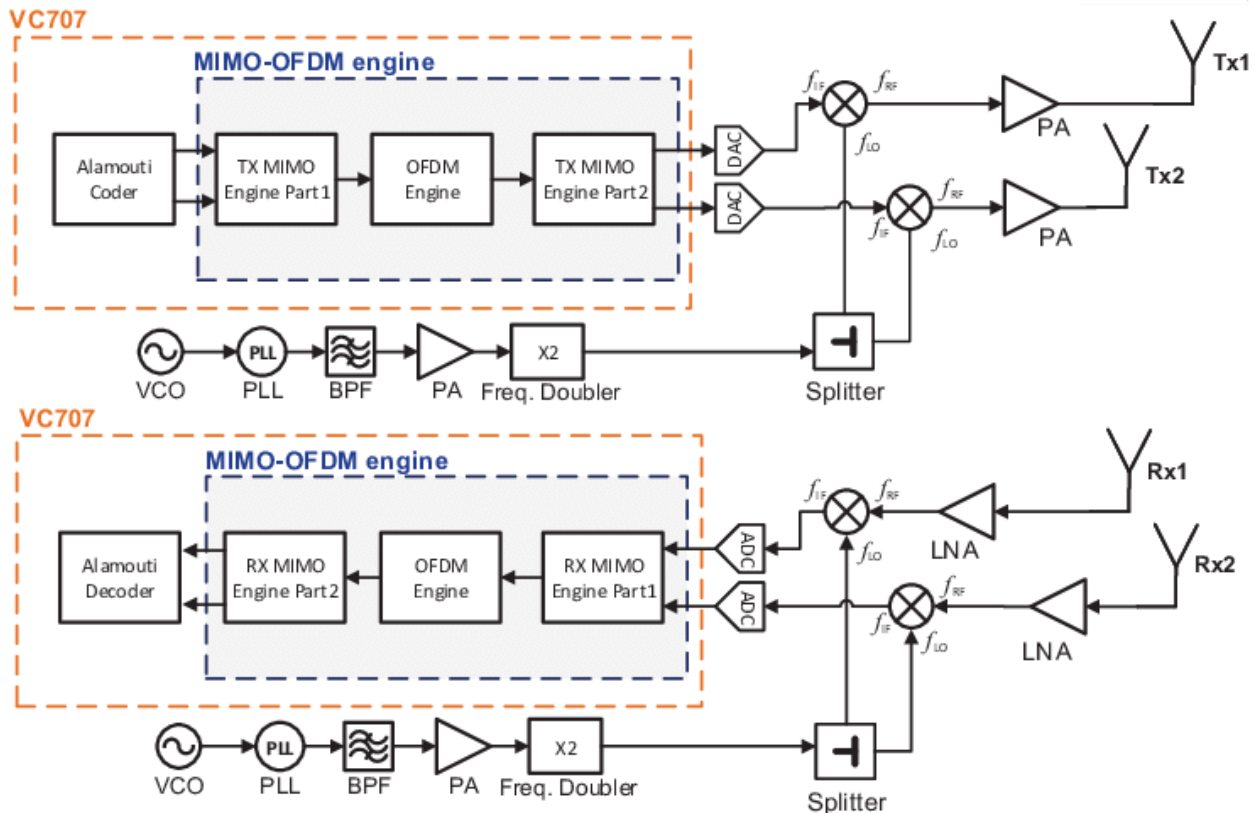
ამ ნაწილში მოკლედ განხილულია ალამუტის დეკოდირების სქემა. ალამუტის კოდი არის სივრცითი-დროით ბლოკური კოდირების (STBC - Space-time block coding) ტექნიკა უკაბელო კომუნიკაციისთვის, რომელიც იყენებს ორ გადამცემ ანტენას და ორი სიმბოლოს პერიოდს მუშაობის გასაუმჯობესებლად. ის მუშაობს სიმბოლოების წყვილის „ჰკვიანური“ გზით გადაცემით, რომელიც იყენებს სხვადასხვა არხის გზებს მრავალფეროვნების გაზრდის მისაღწევად (რაც სისტემას უფრო მდგრადს ხდის ცვალებადობის მიმართ) გადამცემისგან არხის სტატუსის ცოდნის გარეშე. ეს მონაცემთა გადაცემის უფრო საიმედოობის საშუალებას იძლევა და განსაკუთრებით სასარგებლოა სისტემებში, რომლებსაც აქვთ მრავალი გადამცემი ანტენა და მინიმუმ ერთი მიმღები ანტენა. მიმღები აერთიანებს ორივე დროის ინტერვალის მიღებულ სიგნალებს ორივეს საიმედოდ დეკოდირებისთვის. ეს პროცესი ეფექტურია, რადგან ის ეფუძნება ორთოგონალურობის პრინციპს, რაც ნიშნავს, რომ გადაცემული სიმბოლოების გამოყოფა შესაძლებელია მიმღებთან.

ძირითადი უპირატესობები:

- ის მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს სიგნალის საიმედოობას, განსაკუთრებით ცვალებად არხებში, იმის უზრუნველყოფით, რომ მაშინაც კი, თუ ერთი გზა ცუდია, სიგნალი მაინც შეიძლება იქნას მიღებული მეორე გზით;
- გადამცემს არხის შესახებ ინფორმაციის არქონა: გადამცემს არ სჭირდება არხის კოეფიციენტების ცოდნა, რაც მას პრაქტიკულ და ფართოდ გამოყენებულ ტექნიკად აქცევს.
- გამტარობის გაფართოების არარსებობა: ის აღწევს მრავალფეროვნების მომატებას გამტარობის გაზრდის გარეშე, რაც მისი მთავარი უპირატესობაა სხვა მრავალფეროვნების ტექნიკასთან შედარებით.
- დაბალი გამოთვლითი სირთულე: დეკოდირების პროცესი შედარებით მარტივია, რაც მას გამოთვლით ეფექტურს ხდის

რადარის პრაქტიკული რეალიზაციისათვის პლატფორმა VC 707

განხილული რადარისათვის OFDM - MIMO ტექნოლოგიის ბაზაზე, ჩვენ შევარჩიეთ ქვემოთ წარმოდგენილი პლატფორმა VC 707 - რომელიც გულისხმობს მრავალი შემავალი და მრავალი გამომავალი სიგნალების (MIMO) საანტენო სისტემის აპარატურულ იმპლემენტაციას, რომელიც იყენებს ორთოგონალურ სიხშირის დაყოფით მულტიპლექსირების (OFDM) ტექნოლოგიას VC707 პლატფორმას, ალამუტის კოდირებით და (FPGA-Field Programmable Gate Array) PGA ნიშნავს პროგრამირებად ვენტლიურ მასივს (კარიბჭეთა მასივს).



სურ. 8 ციფრული ინტეგრირებული სქემა

სურ. 8-ზე წარმოდგენილია ციფრული ინტეგრირებული სქემა, რომლის დაპროგრამებაც შესაძლებელია შესაბამისი პრაქტიკული შესასრულებლად მისი წარმოების შემდეგ. ძირითადად გამოიყენება კვლევის ან სპეციალიზებული მაღალი ხარისხის აპლიკაციებისთვის რადიო კომუნიკაციებში.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევა ასახავს თანამედროვე რადარული ტექნოლოგიების ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას — OFDM-MIMO არქიტექტურაზე დაფუძნებული სისტემის გამოყენებას ავიაციისთვის მნიშვნელოვან ამოცანაში, რომელიც ეხება აირტურბინულ ძრავებში უცხო სხეულების (FOD) ოპერატიულ აღმოჩენასა და იდენტიფიცირებას. მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ ორთოგონალური სიხშირული გაყოფის მულტიპლექსირება და მრავალანტენიანი სივრცითი მულტიპლექსირება ქმნის მაღალი გარჩევადობის, დოპლერული მგრძნობელობისა და ხმაურ-ვიბრაციის მიმართ მდგრადი ზონდირების მექანიზმს, რომელიც არსებითად აძლიერებს ძრავის ჰაერმიმღების გარემოს მონიტორინგის ეფექტურობას.

კვლევამ აჩვენა, რომ ალამუტის სივრცით-დროითი კოდირების, სხივური ფორმირების და OFDM ქვეგადამტანების ორთოგონალურობის ერთიანობა უზრუნველყოფს ნაწილაკების სივრცითი და სიხშირული დისტრიბუციის ზუსტ აღდგენას რეალურ დროში, რაც კრიტიკულია მათი ტიპისა და შესაძლო ზიანის მასშტაბის ოპერატიული შეფასებისთვის. FPGA-VC707 პლატფორმაზე განხორციელებული იმპლემენტაცია ადასტურებს სისტემის პრაქტიკულ რეალიზირებას და ხაზს უსვამს მის მასშტაბირებადობას მომავალი DFRC (Dual-Function Radar-Communication) სისტემებისკენ.

მთლიანობაში, OFDM-MIMO რადარული სისტემა წარმოადგენს მაღალპოტენციურ ტექნოლოგიურ საფუძველს FOD-ის სტრუქტურულ მონიტორინგში. მისი დანერგვა მნიშვნელოვნად გააძლიერებს ავიაციის უსაფრთხოების სტანდარტებს, შეამცირებს ძრავის დაზიანების რისკებს და ხელს შეუწყობს ინოვაციური, ინტელექტუალური დიაგნოსტიკური პლატფორმების განვითარებას თანამედროვე საავიაციო ინდუსტრიაში.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტური მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Andro maisuradze, Giorgi Mushkudiani, Dato Metreveli, Giorgi Gedaminski. *Analysis of foreign objects ingress into aircraft gasturbine engines and methods of their recording. AIR TRANSPORT 2019 ISSN 1512-4916 63-75;*
2. 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);
3. Amrita Vishwa Vidyapeetham Coimbatore-641112, India“ *Visualization of OFDM Using Microsoft Excel Spreadsheet in Linear Algebra“ Perspective Conference Paper · August 2012;*
4. Y.L. Sit. „*MIMO OFDM RadarCommunication System with Mutual Interference Cancellation*“. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017;
5. Benjamin Nuss, Lucas Giroto de Oliveira and Thomas Zwick „*Frequency comb MIMO OFDM radar demonstrator with high unambiguous velocity*“, Institute of Radio Frequency Engineering and Electronics, Karlsruhe Institute of Technology, 76131 Karlsruhe, Germany.

Detection and Identification of Foreign Objects (Particles) in Aircraft Gas-Turbine Engines Using an OFDM–MIMO Radar System

Teimuraz Kortua¹, Andro Maisuradze²

^{1,2} Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *Gas-turbine engines of aircraft are highly sensitive to foreign objects entering the flow path, which can lead to severe engine damage or significant degradation of operational efficiency [1]. A promising approach for real-time detection and identification of such objects is the use of radar systems based on Orthogonal Frequency-Division Multiplexing and Multiple-Input Multiple-Output (OFDM–MIMO) technologies [4]. Developing such a radar requires achieving high range resolution, Doppler sensitivity, and robustness to multipath reflections, noise, and vibration. Moreover, extreme operational conditions—such as high air-flow velocity, temperature, and humidity may influence critical parameters, including the radar cross section (RCS) of detected particles.*

Key words: *Radar, Receiver, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), transmit diversity.*