

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Miloš D. Jevtić

VIŠECILJNA OPTIMIZACIJA IMPULSNE POVORKE U
POLUPROVODNIČKOM IMPULSNOM DOPLER RADARU

doktorska disertacija

Beograd, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Miloš D. Jevtić

**MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF THE PULSE BURST
WAVEFORM IN SOLID-STATE PULSE-DOPPLER RADAR**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

Podaci o mentoru, članovima Komisije za odbranu doktorske disertacije i datumu odbrane

Mentor: dr Branko Kovačević, profesor emeritus
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije: dr Željko Đurović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Nikola Zogović, viši naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu – Institut „Mihajlo Pupin“

dr Veljko Papić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr. Sanja Vraneš, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: _____

Izjave zahvalnosti

Izuzetno sam zahvalan prof. dr Branku Kovačeviću što je prihvatio da mi bude mentor. Njegovo učešće je bilo ključno za realizaciju ove disertacije. Počastvovan sam činjenicom da mi je mentor naučnik sa tako izuzetnom biografijom.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Stevici Graovcu, koji mi je bio mentor za studentski istraživački rad. Da nije bilo njegove podrške i ohrabivanja, najverovatnije ne bih ni upisao doktorske studije, a kamoli ih završio. Zahvaljujem mu se za mudro i efikasno vođenje kroz zamršen lavirint obaveza na doktorskim studijama, objavljivanja naučnih radova i istraživanja u vezi teme doktorske disertacije. Profesor Graovac je nastavio da me savetuje čak i u periodu kada to više nije bila njegova formalna obaveza, u ulozi de-facto ko-mentora tokom izrade disertacije, zbog čega sam mu posebno zahvalan. Njegovo strpljenje za sve moje pauze u radu, izazvane poslovnim obavezama, privatnim problemima ili klonućima duha, bilo je daleko iznad granica koje je podrazumevala njegova formalna uloga. Smatram se srećnim što ga poznajem i što saradjujemo.

Vrlo sam zahvalan dr Nikoli Zogoviću, kolegi iz Instituta „Mihajlo Pupin“ (IMP), zemljaku Kragujevcianinu i dugogodišnjem kancelarijskom „cimeru“. Da nije bilo dr Zogovića, ne verujem da bih se ikada zaposlio u IMP, niti razmišljao o istraživanju i doktorskim studijama. Iako nije imao nikakvu formalnu obavezu, dr Zogović je de-facto imao ulogu ko-mentora u istraživanju vezanom za ovu disertaciju, objavljivanju naučnih radova i pripremi same disertacije. Posebno sam mu zahvalan što me je upoznao sa svetom višeciljne optimizacije, zatim za ideju o kombinovanju nedominiranih rešenja iz više sukcesivnih izvršenja NSGA-II, kao i za nebrojene veoma korisne savete u skoro svim fazama i aspektima mog istraživačkog rada u vezi ove disertacije. Iskreno se nadam da ću i u budućnosti imati priliku da saradjujem sa ovim sjajnim čovekom i naučnikom.

Zahvaljujem se svim članovima Komisije za doktorski ispit i prihvatanje teme, Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata, Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije i Komisije za odbranu doktorske disertacije, na tome što su svoje dragoceno vreme uložili da bi pomogli u realizaciji ove disertacije.

Zahvaljujem se Ministarstvu nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije, za delimično finansiranje mog istraživačkog rada u vezi disertacije, kroz projekat TR32051, kao i nakon završetka pomenutog projekta.

Zahvaljujem se prof. dr Sanji Vraneš, direktorki IMP, na veoma korisnim savetima u vezi izrade disertacije, kao i na ideji da se algoritam NSGA-II+CES ispita na računarskom hardveru najnovije generacije, koja je delimično i realizovana.

Zahvaljujem se nekadašnjim članovima uprave društva Institut „Mihajlo Pupin“ – Računarski sistemi d.o.o. (IMP RS), direktorki dr Vesni Živković i pomoćniku direktora Marku Hrašovecu, pre svega zato što su me zaposlili, a zatim i za moralnu i finansijsku podršku u mojim ranijim pokušajima akademskog usavršavanja. Posebno sam zahvalan dr Vesni Živković što je imala poverenja da na mene prenese određene administrativne obaveze na naučno-istraživačkom projektu TR32051, što me je dodatno motivisalo da upišem doktorske studije.

Zahvaljujem se nekadašnjim kolegama Miroslavu Petroviću i Milovanu Stamatoviću, sa kojima sam zajedno pisao svoje prve stručne radove, naučivši mnogo od njih. Posebno sam zahvalan kolegi Stamatoviću jer me je uveo u tematiku softvera za radarske sisteme i jer je verovao u mene čak i kada su drugi sumnjali i imao smelosti i dobre volje da mi poveri određene složene razvojne zadatke, čijom sam uspešnom realizacijom stekao uslove za napredak u karijeri i ulazak u polje istraživačkog rada.

Zahvaljujem se sadašnjoj upravi društva IMP RS, za finansiranje doktorskih studija, delimično finansiranje prezentovanja radova na konferencijama i obezbeđivanje hardverskih i softverskih resursa neophodnih za istraživanje. Posebno se zahvaljujem direktoru Vladimiru Simeunoviću i pomoćniku direktora Siniši Marinkoviću, koji su mi osim na navedene načine pomogli i obezbeđujući mi slobodno vreme potrebno za rad na disertaciji.

Zahvaljujem se koleginicama i kolegama iz IMP RS koji su me menjali na mojim dužnostima u periodima kada sam bio zauzet radom u vezi disertacije.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojoj porodici, supruzi Ivani i sinu Vasiliju, za strpljenje i razumevanje koje su pokazali tokom mog studiranja, istraživanja i izrade disertacije. Njihova podrška i žrtva koju su podneli, jer sam veliku količinu vremena i energije trošio na studije umesto za njih i sa njima, su bili među ključnim faktorima za uspešnu realizaciju ove disertacije.

Najveća zahvalnost ide mojim roditeljima, majci Mariti i ocu Dušanu, inženjerima, stvaraocima, divnim ljudima. Da nije bilo njihove nesebične i bezrezervne ljubavi i podrške tokom celog mog života, nikada ne bih stigao do ove. Zbog toga im svim srcem posvećujem ovu disertaciju!

Podaci o doktorskoj disertaciji pod naslovom „Višeciljna optimizacija impulsne povorke u poluprovodničkom impulsnom Dopler radaru“

Sažetak

U poluprovodničkom impulsnom Dopler radaru sa procesorom za otkrivanje pokretnih ciljeva (MTD) neophodna je primena tehnika učešljavanja kratkih i dugih impulsa i rada sa različitim frekvencijama ponavljanja impulsa (PRF), radi ublažavanja problema zamračivanja i slepih zona, respektivno. Jedna vrsta impulsne povorke koja kombinuje obe tehnike je koherentna učešljana povorka impulsa sa višestrukim PRF (MPCIPB).

Cilj disertacije je ispitivanje mogućnosti optimizacije MPCIPB maksimizacijom tri kriterijuma, odnosa signal-šum za objekte na instrumentalnoj daljini (koji utiče na maksimalnu daljinu otkrivanja objekata), Doplerove vidljivosti (koja utiče na otkrivanje objekata u zonama izraženog klatera) i rezolucije po radijalnoj brzini, uz korišćenje što manjeg broja promenljivih odlučivanja, metodom koja je tačna, brza i skalabilna.

Za potrebe disertacije razvijeni su matematički model predmetnog optimizacionog problema, zasnovan na poznatim teorijskim modelima i optimizacioni algoritam NSGA-II+CES, zasnovan na poznatom višeciljnom evolutivnom algoritmu NSGA-II.

Numeričke simulacije na primeru hipotetičkog savremenog VHF radara pokazuju da postoje slučajevi kada problem nema jedinstveno optimalno rešenje, već skup Pareto optimalnih (PO) rešenja i da Pareto front ima delove u kojima je moguće među kriterijumima ostvariti trampu od praktičnog značaja. Ceo skup PRF može se zameniti sa dve promenljive odlučivanja koje ga indirektno definišu, nezavisno od broja PRF. NSGA-II+CES daje PO skup (POS) vrlo blizak egzaktnom POS dobijenim iscrpnom pretragom, ali je skalabilniji i treba mu za tri reda veličine manje operacija poređenja za pronalaženje POS. Merenja na savremenim računarima pokazuju da NSGA-II+CES ima potencijal za primenu u prilagođavanju MPCIPB u realnom vremenu.

Ključne reči

evolutivni algoritam, impulsna povorka, MTD, NSGA-II, Pareto optimalnost, poluprovodnički, radar

Naučna oblast

Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast

Upravljanje sistemima i obrada signala

Information on the doctoral dissertation titled “Multi-objective Optimization of the Pulse Burst Waveform in Solid-state Pulse-Doppler Radar”

Abstract

Solid-state pulse-Doppler radar with the moving target detector processor has to operate with short and long pulse interleaving and multiple pulse repetition frequencies (PRF), to mitigate the range eclipsing and Doppler blind zone issues. A type of pulse burst waveform combining both mitigation techniques is the multiple-PRF coherent interleaved pulse burst (MPCIPB).

The goal of the dissertation is to explore the possibility of the MPCIPB optimization by maximizing the three criteria: signal-to-noise ratio of targets at the instrumented range, Doppler visibility, and radial velocity resolution. Maximization should be achieved with as few decision variables as possible, and with an accurate, fast and scalable optimizer.

Mathematical model of the subject problem, based on known theoretical models, is developed for this dissertation, and so is the optimization algorithm called NSGA-II+CES, based on NSGA-II, the well-known multi-objective evolutionary algorithm.

The hypothetical modern VHF radar example is used within numerical simulations to show that there are cases of the subject problem without a unique optimal solution, but with a set of Pareto optimal (PO) solutions. Furthermore, the Pareto frontier has parts where a reasonable trade-off between the criteria can be achieved. The PRF set can be substituted with two decision variables which define it indirectly, regardless of its cardinality. The NSGA-II+CES obtains the PO set (POS) which is very close to the exact POS obtained by exhaustive search. However, NSGA-II+CES is more scalable and requires over three orders of magnitude smaller number of comparisons to determine the POS. NSGA-II+CES has the potential for the use in real-time MPCIPB adaptation, based on the execution times on the contemporary computers.

Key words

evolutionary algorithm, MTD, NSGA-II, Pareto optimality, pulse burst, radar, solid-state

Scientific field

Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering

Scientific subfield

Automation and control systems

Sadržaj

Nomenklatura.....	xi
1 Uvod.....	1
2 Pregled literature	9
3 Matematički model.....	13
3.1 Matematički model M15	15
3.1.1 Prikaz matematičkog modela M15	15
3.1.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M15, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija	24
3.2 Matematički model M17	31
3.2.1 Prikaz matematičkog modela M17	32
3.2.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M17, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija	36
3.3 Matematički model M19	47
3.3.1 Prikaz matematičkog modela M19	47
3.3.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M19, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija	53
4 Efikasan algoritam za aproksimativno rešavanje problema izbora impulsne povorke zasnovan na višeciljnom evolutivnom algoritmu.....	65
4.1 Inicijalni algoritam	66
4.1.1 Kratak opis NSGA-II.....	66
4.1.2 Specifičnosti implementacije NSGA-II u problemu izbora impulsne povorke.....	67
4.1.3 Kratak opis arhitekture i realizacije softverskog sistema	68
4.2 Ispitivanje inicijalnog algoritma.....	69
4.3 Modifikacije algoritma	73
4.4 Ispitivanje NSGA-II+CES.....	75
4.5 Diskusija o podešavanju i performansama NSGA-II+CES i NSGA-II.....	84
5 Evaluacija performansi efikasnog algoritma za izbor impulsne povorke i diskusija o rezultatima studije, njihovom potencijalnom značaju i pravcima daljeg istraživanja.....	91

5.1	Evaluacija performansi NSGA-II+CES na matematičkom modelu M19	91
5.2	Dokaz istinitosti polaznih hipoteza	94
5.2.1	Dokaz istinitosti hipoteze H1	94
5.2.2	Dokaz istinitosti hipoteze H2.....	94
5.2.3	Dokaz istinitosti hipoteze H3.....	94
5.2.4	Dokaz istinitosti hipoteze H4.....	95
5.3	Značaj NSGA-II+CES za praktičnu primenu.....	95
5.4	Mogući pravci daljeg istraživanja	97
5.4.1	Mogući pravci daljeg istraživanja u vezi matematičkog modela.....	97
5.4.2	Mogući pravci daljeg istraživanja u vezi optimizacionog algoritma.....	98
6	Zaključak	99
	Literatura	103

Nomenklatura

U narednoj tabeli navedene su korišćene skraćenice.

CA	clutter attenuation
CPI	coherent processing interval
DFT	diskretna Furijeova transformacija
DVP	Doppler visibility percentage
EA	evolutivni algoritam
EM	elektromagnetan
EMO	evolutionary multi-objective optimization
EW	elementary waveform
GA	genetski algoritam
HPRF	high-PRF
KanGAL	Kanpur Genetic Algorithms Laboratory
KAPOS	kompozitna aproksimacija POS
KAPF	kompozitna aproksimacija PF
LPRF	low-PRF
LSB	least significant bit
MOEA	multi-objective evolutionary algorithm
MOO	multi-objective optimization
MO-VNS	Multi-objective variable neighborhood search
MPCIPB	multiple-PRF coherent interleaved pulse burst
MPRF	medium-PRF
MSOPS	Multiple single objective Pareto sampling
MTD	moving target detector
NSGA-II	Non-dominated sorting genetic algorithm II
NSGA-II+CES	NSGA-II with Combining of solution sets using Exhaustive Search
PF	Pareto front

PO	Pareto optimalan
POPDWD	Pareto optimal pulse Doppler waveform design
POS	Pareto optimalan skup
PRI	pulse-repetition interval
PRF	pulse-repetition frequency
RCS	radar cross section
SNR	signal-to-noise ratio
VHF	very high frequency

U narednoj tabeli navedene su korišćene oznake konstanti, promenljivih i funkcija.

β	širina frekvencijskog opsega unutar-impulsne modulacije
B	širina propusnog opsega prijemnika
$BZD(n, f)$	raspored slepih zona za n -tu PRF
c	brzina svetlosti, 299792458 m/s
CA	slabljenje klatera u dB
CA_{min}	minimalno prihvatljivo slabljenje klatera u dB
C_C	broj tačnih rešenja u KAPOS
C_D	ukupan broj rešenja u KAPOS
C_{SNR}	Kolektivni član izraza za SNR_L koji ne zavisi od promenljivih odlučivanja
Δf_{ua}	opseg frekvencija, u kojem ne sme biti pravih slepih Doplerovih frekvencija
ΔPRI_S	kašnjenje uzlazne ivice dugog impulsa u odnosu na uzlaznu ivicu kratkog impulsa
ΔPRI_{Ln}	interval od uzlazne ivice dugog impulsa do kraja elementarnog talasnog oblika
Δr	skup odstupanja promenljivih faktora PRI
Δr_n	odstupanje promenljivog faktora PRI
Δr_{min}	najmanje odstupanje promenljivog faktora PRI

Δr_{\max}	najveće odstupanje promenljivog faktora PRI
Δr_{avg}	srednje odstupanje promenljivog faktora PRI
Δv_b	širina osnovne slepe zone
Δv_{cl}	širina spektra klatera
$\Delta v_{cl,max}$	maksimalna dozvoljena širina spektra klatera koji zaslepljuje n_f Dopler filtera
D	maksimalan dozvoljen faktor popune
DVP	procenat Doplerove vidljivosti
F	faktor šuma prijemnika
f	frekvencija
$\mathbf{F}(\mathbf{x})$	vektor funkcija cilja
$F_i(\mathbf{x})$	funkcija cilja
F_B	prva prava slepa Doplerova frekvencija
f_c	granična učestanost idealnog visokopropusnog filtra kojim se modeluje cenzurisanje Dopler filtera
f_c^*	najniža granična učestanost idealnog visokopropusnog filtra koja obezbeđuje minimalno prihvatljivo slabljenje klatera
f_{max}	apsolutna vrednost maksimalne Doplerove frekvencije od interesa
γ	odnos maksimalnog i minimalnog PRI u skupu PRI
G	dobitak antene
$g_j(\mathbf{x})$	funkcija ograničenja
k	Bolcmanova konstanta, $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
k_f	Činilac u izrazu za broj zaslepljenih Dopler filtera
λ	talasna dužina nosioca
L_S	sistemske gubici
μ_C	srednja vrednost broja tačnih rešenja u aproksimaciji POS
μ_D	srednja vrednost broja različitih rešenja u aproksimaciji POS
max_C	maksimalna vrednost broja tačnih rešenja u aproksimaciji POS

max_D	maksimalna vrednost broja različitih rešenja u aproksimaciji POS
min_C	minimalna vrednost broja tačnih rešenja u aproksimaciji POS
min_D	minimalna vrednost broja različitih rešenja u aproksimaciji POS
M	broj ciljeva, tj. funkcija cilja
$MBZD(f)$	raspored višestrukih slepih zona
n	redni broj PRI
n_C	broj cenzuriranih Dopler filtara
n_f	broj zaslepljenih Dopler filtara
n_P	broj PRI unutar jednog CPI
N	broj različitih PRF u talasnom obliku
N_C	aproksimativna vrednost broja operacija poređenja potrebnih za određivanje KAPOS
N_{DFT}	dužina DFT
N_G	broj generacija u NSGA-II
N_P	veličina populacije u NSGA-II
N_R	broj izvršavanja NSGA-II
ω	ugaona brzine okretanja antene
$OBZCD(f)$	raspored broja preklopljenih slepih zona
p_c	verovatnoća ukrštanja u NSGA-II
p_m	verovatnoća mutacije u NSGA-II
PRF_n	n -ta PRF
PRI_{avg}	srednja vrednost PRI
PRI_{avg}^*	željena (ciljana) srednja vrednost PRI
PRI_{max}	najduži PRI u skupu PRI
PRI_{min}	najkraći PRI u skupu PRI
PRI_n	n -ti PRI
PRI_{STEP}	korak diskretizacije promenljive odlučivanja PRI_{min}
P_t	vršna snaga emitovanog signala

Q_{SNR}	minimalan dozvoljen odnos SNR_S i SNR_L
R	daljina objekta
R_E	maksimalna daljina koja je zamračena tokom emitovanja dugog impulsa
R_I	instrumentalna daljina
R_{min}	minimalna daljina od interesa
r_n	promenljivi faktor PRI
r^*	željeno (ciljano) povećanje prve prave slepe Doplerove frekvencije
r_{UL}^*	gornji limit za promenljivu odlučivanja r^* kada se vrši optimizacija
σ	radarska površina objekta
σ_C	standardna devijacija broja tačnih rešenja u aproksimaciji POS
σ_D	standardna devijacija broja različitih rešenja u aproksimaciji POS
σ_f	standardna devijacija spektra klatera
σ_{fs}	standardna devijacija spektra klatera usled skeniranja antene
σ_{fw}	standardna devijacija spektra klatera usled vetra
SNR_L	odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na instrumentalnoj daljini „osvetli“ dugim impulsom
SNR_S	odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na maksimalnoj daljini koja je zamračena tokom emitovanja dugog impulsa „osvetli“ kratkim impulsom
θ_3	trodecibelska širina glavnog snopa antene
T_0	standardna temperatura
τ_L	trajanje dugog impulsa
τ_S	trajanje kratkog impulsa
τ_{STEP}	korak diskretizacije promenljive odlučivanja τ_L
v_{max}	apsolutna vrednost maksimalne radijalne brzine od interesa
$-VR_{max}$	negirana najveća rezolucija po radijalnoj brzini
w_{10}	Rejljeva širina Dopler filtra
\mathbf{X}	dopustivi prostor odlučivanja
\mathbf{x}	vektor promenljivih odlučivanja

x_i	promenljiva odlučivanja
Z	dopustivi prostor ciljeva

1 Uvod

Radar je elektromagnetni (EM) sistem koji emituje elektromagnetne signale, prima signale odbijene od strane objekata u prostoru i analizira primljene signale radi izdvajanja informacija o lokaciji i drugim karakteristikama objekata [1]. Termin radar je izvorno bio skraćenica za „*radio detection and ranging*“ [2]. Osmatrački radar (eng. *surveillance radar*) je radar namenjen za otkrivanje, lociranje i praćenje objekata unutar prostora velike zapremine [1]. Radar za vazdušno osmatranje (eng. *air-surveillance radar*) je osmatrački radar namenjen za otkrivanje i praćenje vazduhoplova u određenom delu vazdušnog prostora [1].

U civilstvu, radari za vazdušno osmatranje uglavnom se primenjuju u kontroli letenja [2]. Vojne primene radara za vazdušno osmatranje, pored kontrole letenja u okolini vojnih aerodroma, uključuju rano upozoravanje, akviziciju ciljeva i navođenje lovačke avijacije [2].

Osnovni delovi radara su:

- Predajnik – generiše signal odgovarajućeg talasnog oblika i snage, u skladu sa namenom radara [3];
- Duplekser – preusmeravanjem signala omogućuje da se jedna antena koristi i za predaju i za prijem [3];
- Antena – obezbeđuje propagaciju predajnog signala u prostor i prikupljanje signala odbijenih od objekata [3]. Antena radara za vazdušno osmatranje je usmerena, a skeniranje prostora se vrši mehanički ili elektronski;
- Prijemnik – pojačava primljeni signal do nivoa potrebnog za detekciju [3] i vrši spuštanje učestanosti nosioca do vrednosti pogodne za analogno/digitalnu konverziju i dalju obradu u digitalnom domenu;
- Procesor signala – sprovodi različite korake obrade primljenog signala, kao što su prilagođeno filtriranje i Dopler obrada, u cilju diskriminacije između korisnog i neželjenog signala, ili korisnih signala koji potiču od različitih objekata, te donosi odluku o prisustvu objekta na osnovu kriterijuma koji obezbeđuje predefinisanu verovatnoću lažnih pozitivnih odluka (alarma) usled šuma [3].

Ako postoji relativno kretanje objekta u odnosu na radar, učestanost EM talasa, koji je odbijen od objekta i primljen u radaru, razlikovaće se od učestanosti EM talasa koji je emitovao radar [4]. Opisana pojava naziva se Doplerov efekat [4]. Dopler radar (eng. *Doppler radar*) je radar koji koristi Doplerov efekat da bi odredio radijalnu komponentu relativne brzine objekta u odnosu na radar ili da bi razdvojio objekte na osnovu različitih radijalnih brzina [1]. Impulsni Dopler radar

(eng. pulsed-Doppler radar ili pulse-Doppler radar) je Dopler radar koji emituje impulsne signale [1].

Osnovna svrha impulsnog Dopler radara je razdvajanje odraza (primljenih odbijenih signala) malih pokretnih objekata, tzv. ciljeva (eng. target), koji su od interesa, od odraza drugih, stacionarnih ili sporo pokretnih objekata ili pojava, koji nisu od interesa, za koje se koristi termin klater (eng. clutter) [5]. Klater obuhvata odraze od tla, mora, kiše, ptica, insekata, aurora, [5] itd. Impulsni Dopler radar se u načelu zasniva na obradi primljenog signala pomoću banke Dopler filtara koji su prilagođeni odzivu ciljeva u opsegu radijalnih brzina od interesa [5]. Pored razdvajanja odraza po radijalnoj brzini, banka Dopler filtara vrši i funkciju koherentne integracije odraza ciljeva u odnosu na termalni šum, a time i povećanje verovatnoće otkrivanja (detekcije) ciljeva [5].

Vremenski interval između dva uzastopna impulsa u signalu koji emituje impulsni radar naziva se period ponavljanja impulsa (eng. pulse-repetition period ili pulse-repetition interval (PRI)) [1]. Recipročna vrednost PRI određuje broj emitovanih impulsa u jedinici vremena i naziva se frekvencija ponavljanja impulsa (eng. pulse-repetition frequency (PRF)) [1]. Često korišćena varijanta talasnog oblika emitovanog signala u impulsnom Dopler radaru je koherentna uniformna povorka impulsa (eng. coherent uniform pulse burst) [6], poznata i kao uniformna povorka impulsa (eng. uniform pulse burst) [5]. Uniformna povorka impulsa podrazumeva da se vremenski period boravka cilja u glavnom snopu (eng. main beam) antene podeli na više intervala koherentne obrade (eng. coherent processing interval (CPI)), pri čemu se u svakom CPI emituje više impulsa sa konstantnom vrednošću PRF [5]. Ovakav talasni oblik obezbeđuje da se nad signalima primljenim tokom jednog CPI može vršiti koherentna integracija [4], [5], pri čemu je moguće u različitim CPI koristiti različite vrednosti PRF i/ili učestanost nosioca, u cilju postizanja PRF i/ili frekvencijske agilnosti impulsnog Dopler radara [5].

Sa stanovišta višeznačnosti (eng. ambiguity) određivanja daljine (eng. range) i Doplerove frekvencije cilja, režimi rada impulsnog radara klasifikuju se na sledeći način:

- Režim niske frekvencije ponavljanja impulsa (eng. low-PRF (LPRF)) podrazumeva da je vrednost PRF takva (dovoljno niska) da je određivanje daljine cilja jednoznačno (eng. unambiguous), a određivanje Doplerove frekvencije cilja višeznačno (eng. ambiguous) [5];
- Režim srednje frekvencije ponavljanja impulsa (eng. medium-PRF (MPRF)) podrazumeva da je vrednost PRF takva da je određivanje daljine i Doplerove frekvencije višeznačno [5];

- Režim visoke frekvencije ponavljanja impulsa (eng. high-PRF (HPRF)) podrazumeva da je vrednost PRF takva (dovoljno visoka) da je određivanje Doplerove frekvencije jednoznačno, a određivanje daljine višeznačno [5].

U kontekstu radara za vazdušno osmatranje, najznačajniji je LPRF režim. Detektor pokretnih ciljeva (eng. moving target detector (MTD)) je vrsta procesora signala koja je specifično osmišljena za potrebe primene u LPRF impulsnim Dopler radarima za vazdušno osmatranje [5]. MTD podrazumeva, između ostalog, obradu signala na bazi banke Dopler filtera i različite vrednosti PRF u različitim CPI [1].

Dve najznačajnije klase radarskih predajnika su [2]:

- Cevni predajnik (eng. vacuum-tube transmitter), zasnovan na mikrotalasnim cevnim oscilatorima ili pojačavačima [2];
- Poluprovodnički predajnik (eng. solid-state transmitter), zasnovan na poluprovodničkim komponentama kao što su mikrotalasni tranzistori itd. [2].

Dobre strane poluprovodničkog predajnika su [3]:

- Ne zahteva specifične uslove, kao što su vruća katoda, visoki naponi, magneti, itd.,
- Ne proizvodi X-zrake,
- Širok propusni opseg,
- Dug životni vek,
- Postepena degradacija performansi,
- Jednostavno održavanje.

Mane poluprovodničkog predajnika su [3]:

- Ograničena vršna snaga, iz čega proizlazi potreba za radom sa dugačkim impulsima i visokim faktorom popune (eng. duty cycle);
- Često je efikasnost niža u odnosu na ekvivalentan cevni predajnik;
- U nekim slučajevima, gabariti i cena mogu biti veći u odnosu na ekvivalentan cevni predajnik.

Usled Doplerovog efekta, spektar primljenog signala, koji je odbijen od nekog objekta, pomeren je po frekvenciji u odnosu na spektar emitovanog signala. Razlika frekvencija primljenog i emitovanog signala naziva se Doplerova frekvencija (eng. Doppler frequency), a proporcionalna je radijalnoj komponenti brzine objekta u odnosu na radar. Objekti različitih radijalnih brzina mogu se razlučiti na osnovu različitih Doplerovih frekvencija, što i jeste glavna karakteristika impulsnog Dopler radara. No, pošto je signal impulsnog radara periodičan, spektar mu je diskretan. Centralna

spektralna linija je na učestanosti nosioca, a ostale spektralne linije su u odnosu na centralnu pomerene za celobrojne umnoške vrednosti PRF [7]. Takav oblik spektra emitovanog signala impulsnog radara, u kombinaciji sa Doplerovim efektom, dovodi do određenih problema, odnosno ograničenja, u pogledu mogućnosti otkrivanja objekata.

Radi razumevanja pomenutih problema, pogodno je umesto samog signala posmatrati njegovu kompleksnu anvelopu [8]. Štaviše, praktična implementacija impulsnog Dopler radara uključuje određivanje kompleksne anvelope primljenog signala, najčešće kombinacijom analognog mešača u prijemu i kompleksnog digitalnog mešača u procesoru signala. Kompleksna anvelopa emitovanog signala impulsnog radara ima centralnu spektralnu liniju (odnosno komponentu) na nultoj frekvenciji, dok su ostale spektralne linije na celobrojnim umnošcima vrednosti PRF. Kompleksna anvelopa primljenog signala ima centralnu spektralnu liniju na frekvenciji jednakoj Doplerovoj frekvenciji.

Pošto je za stacionaran klater Doplerova frekvencija jednaka nuli, tj. bliska nuli, kompleksna anvelopa primljenog signala odbijenog od stacionarnog klatera ima spektralne linije na celobrojnim umnošcima vrednosti PRF. Odrazi stacionarnog klatera se mogu potisnuti iz primljenog signala pomoću filtra koji ima uske nepropusne opsege centrirane na celobrojnim umnošcima vrednosti PRF. U impulsnom Dopler radaru primljeni signal se, pre filtriranja, odabira frekvencijom koja je jednaka vrednosti PRF, čime se sve spektralne linije preslikavaju u opseg od nulte frekvencije do PRF, a spektar kompleksne anvelope primljenog signala postaje periodičan. Filtriranje se vrši pomoću banke Dopler filtara koji su na pogodan način raspoređeni u opsegu od nulte frekvencije do PRF. Izlaz filtra centriranog na nultoj frekvenciji, ili grupe filtara u okolini nulte frekvencije, odbacuje se ili usmerava na dodatnu obradu (npr. prostorno filtriranje pomoću mape klatera), čime se postiže potiskivanje klatera. Banka Dopler filtara često se implementira pomoću diskretne Furijeove transformacije (DFT), tretiranjem spektralnih odbiraka u domenu DFT kao izlaza filtara u banci.

Problem je u tome što u LPRF (i MPRF) režimu rada, cilj može imati takvu radijalnu brzinu da mu Doplerova frekvencija ulazi u opseg frekvencija koji je cenzurisan radi potiskivanja klatera pa će time i cilj biti potisnut. Ovakav opseg frekvencija naziva se slepa zona (eng. Doppler blind zone), jer je radar „slep“, odnosno, ne može da otkriva ciljeve sa određenim opsegom radijalnih brzina. Slepe zone su centrirane na celobrojnim umnošcima vrednosti PRF, a širina im je jednaka širini cenzurisanih Dopler filtara.

Problem slepih zona u impulsnom Dopler radaru može se prevazići različitim vrednostima PRF u različitim CPI, jer ako je cilj u slepoj zoni pri jednoj vrednosti PRF, neće biti u slepoj zoni pri drugoj vrednosti PRF, pod uslovom da su vrednosti PRF pogodno odabrane. Otkrivanje ciljeva

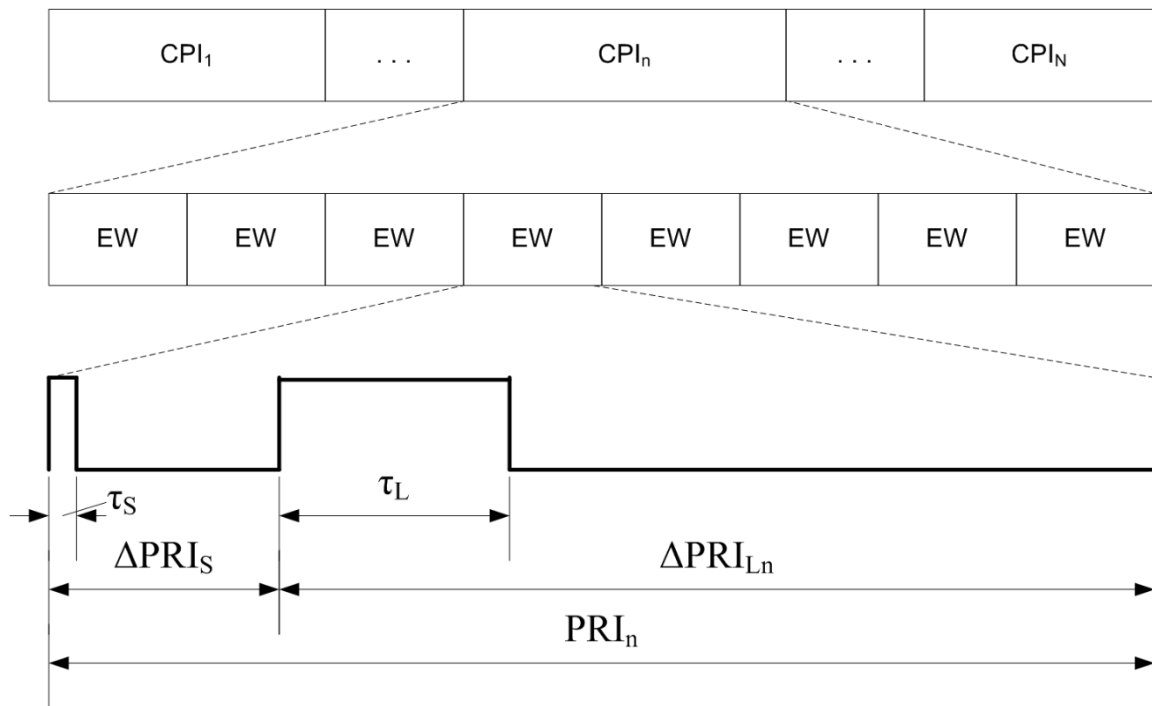
svih radijalnih brzina nije moguće u svim CPI, ali se smanjenjem vrednosti PRF može postići da je svaka radijalna brzina od interesa vidljiva u nekim CPI.

Zamračivanje (eng. eclipsing) je gubitak informacija o radarskim odrazima na daljinama koje odgovaraju vremenu u kojem je onemogućen prijem jer je u toku emitovanje predajnog impulsa [1]. Što je viši faktor popune radarskog talasnog oblika, to je izraženije zamračivanje. Upotreba poluprovodničkog predajnika nameće rad sa dugačkim impulsima i visokim faktorom popune, da bi se ostvarila potrebna srednja snaga, uprkos ograničenoj vršnoj snazi. Usled toga, zamračivanje je značajan ograničavajući faktor u radaru sa poluprovodničkim predajnikom. U slučaju poluprovodničkog radara koji radi u LPRF režimu, zamračeni su objekti bliski radaru, tj. zamračena zona počinje od nulte daljine, a širina joj je proporcionalna trajanju predajnog impulsa.

Efekti zamračivanja mogu se ublažiti naizmeničnim emitovanjem, tj. učešljavanjem (eng. interleaving) impulsa različitih trajanja – kratkih i dugačkih. U periodima vremena kada se emituju kratki impulsi, omogućeno je otkrivanje ciljeva na malim daljinama, jer je širina zamračene zone smanjena, dok su performanse otkrivanja na velikim daljinama smanjene, jer je i energija sadržana u impulsu smanjena. Sa druge strane, u periodima vremena kada se emituju dugački impulsi onemogućeno je otkrivanje na malim daljinama, ali je omogućeno otkrivanje na velikim daljinama, zahvaljujući velikoj energiji sadržanoj u dugačkim impulsima.

Da bi se istovremeno prevazišli problemi slepih zona i zamračivanja, potrebno je primeniti i različite PRF u različitim CPI i učešljavanje impulsa različitih trajanja. Jedan složen talasni oblik koji ima potencijal da obezbedi vidljivost svih daljina i radijalnih brzina od interesa je koherentna učešljana povorka impulsa sa višestrukim PRF (eng. multiple-PRF coherent interleaved pulse burst (MPCIPB)), prikazana na Sl. 1.

Slično uniformnoj povorci impulsa, MPCIPB podrazumeva da se vremenski period boravka cilja u glavnom snopu antene (eng. dwell time) podeli na N CPI. No, dok se u uniformnoj povorci impulsa u svakom CPI emituje sekvenca od više impulsa sa konstantnom vrednošću PRF, u MPCIPB se u svakom CPI emituju dve učešljane sekvence kratkih i dugih impulsa, sa konstantnom vrednošću PRF. Pomenuta organizacija MPCIPB je na nešto drugačiji način predstavljena na Sl. 1, gde je CPI podeljen na više elementarnih talasnih oblika (eng. elementary waveform (EW)), od kojih svaki sadrži kratak impuls trajanja τ_S i dug impuls trajanja τ_L , a kašnjenje uzlazne ivice dugog impulsa u odnosu na uzlaznu ivicu kratkog impulsa ΔPRI_S je konstantno. Trajanje EW u n -tom CPI označeno je sa PRI_n , a kratak i dug impuls se efektivno ponavljaju sa periodom ponavljanja koja je jednaka vrednosti PRI_n . τ_S , τ_L , ΔPRI_S i broj EW unutar CPI n_p imaju iste vrednosti u svim CPI, dok je vrednost PRI nepromenljiva unutar jednog CPI, ali se menja prelaskom u naredni CPI.



Sl. 1 – Koherentna učešljana povorka impulsa sa višestrukim PRF (MPCIPB). [Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer, Operations Research Proceedings 2015 by K.F. Doerner et al. \(eds.\), © Springer International Publishing Switzerland 2017 \[39\].](#)

Ako se apstrahuje modulacija unutar kratkog i dugog impulsa, MPCIPB je potpuno definisan veličinama τ_S , τ_L , ΔPRI_S , n_p , N i skupom PRI. Prema tome, projektovanje, odnosno podešavanje ili izbor MPCIPB svodi se na izbor pomenutih veličina. Predmet istraživanja ove studije je rešavanje tehničkog problema izbora MPCIPB uz istovremenu optimizaciju po tri kriterijuma, odnosno cilja, pod određenim uslovima, tj. ograničenjima, a korišćenjem promenljivih odlučivanja koje neposredno ili posredno utiču na veličine koje definišu MPCIPB.

Ciljevi koje je potrebno maksimizirati optimalnim izborom MPCIPB su:

1. Odnos signal-šum (eng. signal-to-noise ratio (SNR)) za objekte na maksimalnoj daljini od interesa, tj. instrumentalnoj daljini (eng. instrumented range [2]);
2. Vidljivost u domenu Doplerovih frekvencija (eng. Doppler visibility);
3. Rezolucija po radialnoj brzini, odnosno po Doplerovoj frekvenciji (eng. Doppler resolution [2]).

Navedenim izborom ciljeva, izvršena je transformacija prostora ciljeva, koji u opštem slučaju može da ima više od tri cilja, na trodimenzionalan prostor ciljeva posebno značajnih za poluprovodnički impulsni Dopler radar, koji radi u LPRF režimu. U delovima prostora gde je otkrivanje objekata ograničeno termalnim šumom (eng. clear region [2]), odnos-signal šum određuje performanse otkrivanja objekata. Ovakvi delovi prostora su pretežno na velikim daljinama, pa je zato od značaja da se obezbedi adekvatan odnos signal-šum na instrumentalnoj

daljini. Odnos signal-šum na instrumentalnoj daljini utiče na maksimalnu daljinu otkrivanja. Maksimizacija vidljivosti u Dopler domenu, odnosno minimizacija slepih zona, od krucijalnog je značaja za otkrivanje objekata u delovima prostora sa izraženim prisustvom klatera, koji su uglavnom na malim daljinama. Poboljšanjem rezolucije po radijalnoj brzini povećava se mogućnost razlučivanja objekata koji se nalaze u istoj rezolucionoj ćeliji po daljini i azimutu, a kreću se različitim brzinama u odnosu na radar, što je značajno za pouzdano praćenje objekata.

Ograničenja koja se uzimaju u obzir u ovoj studiji odnose se na:

- odsustvo zamračenih zona u celokupnom opsegu daljina od interesa,
- minimalnu dozvoljenu vrednost prve prave slepe brzine (eng. first true blind speed [3]), odnosno brzine koja odgovara Doplerovoj učestanosti, koja je najmanji zajednički sadržalac svih PRF korišćenih u MPCIPB,
- maksimalnu dozvoljenu vrednost faktora popune.

Cilj ove studije je da se ispituju sledeće četiri hipoteze koje se odnose na opisan tehnički problem:

- H1 – Postoje slučajevi gde za opisan problem ne postoji jedinstveno optimalno rešenje, već skup Pareto optimalnih (PO) (eng. Pareto optimal [9]) rešenja;
- H2 – Postoje slučajevi gde Pareto front (PF) (eng. Pareto frontier [9]) ima deo u kojem je moguće među ciljevima ostvariti trampu, koja je od praktičnog značaja, tj. ne podrazumeva značajan relativni gubitak u jednom cilju zarad zanemarljivog relativnog dobitka u drugom;
- H3 – U okviru vektora promenljivih odlučivanja, moguće je vektor PRI zameniti drugim promenljivama odlučivanja na takav način da kardinalnost vektora promenljivih odlučivanja ne zavisi od broja PRI N ;
- H4 – Postoji aproksimativan metod rešavanja opisanog problema, koji daje rešenje blisko egzaktnom rešenju dobijenom metodom iscrpne pretrage, ali je skalabilniji i brži od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje PO skupa rešenja.

Eksperiment i simulacija su metode na koje se savremena nauka oslanja u sticanju novog znanja. Međutim, među filozofima nauke postoji aktivna debata o tome da li je eksperiment superioran metod u odnosu na simulaciju. Pojedini autori smatraju da ne postoji suštinska superiornost eksperimenta u odnosu na simulaciju. Tako na primer, Guala [10] smatra da eksperimenti, simulacije i modeli spadaju u istu kategoriju naučnih alata, koji su pozicionirani između našeg poimanja sveta i samog sveta. Simulacija može da proizvede novo znanje, baš kao i

eksperiment, ali prethodno znanje potrebno za dobru simulaciju i dobar eksperiment nije isto [10]. Parke [11] iznosi stav koji se protivi uobičajenom mišljenju da je eksperiment po automatizmu epistemološki privilegovan u odnosu na simulaciju, tj. smatra da eventualna privilegovanost zavisi od konteksta. Parke takođe ukazuje na razlike koje postoje između eksperimenta i simulacije iz pragmatičnih razloga [11]. Na primer, simulacija je najčešće u prednosti u odnosu na eksperiment sa stanovišta materijalnih troškova i brzine dobijanja rezultata [11]. Prednost simulacije u pragmatičnom smislu može imati svoju cenu u epistemološkom smislu, ali Parke [11] navodi kontekste u kojima to nije slučaj, tj. u kojima postoji dovoljno znanje o pojavi koja se proučava da izvođenje eksperimenta na bi stavilo istraživača u epistemološki bolju situaciju u odnosu na sprovođenje simulacije. Sa druge strane, Roush [12] jasno identifikuje uslove kod kojima je eksperiment superioran u odnosu na simulaciju, ali slično kao Parke smatra da ako odgovor koji istraživač traži ne zavisi od neke osobine realnog sveta koja je nepoznata, simulacija je jednako dobra kao i eksperiment.

Fizički procesi uključeni u funkcionisanje impulsnog Dopler radara, kao što je prostiranje EM talasa, njihova interakcija sa objektima u prostoru, Doplerov efekat itd., dobro su poznati. Isto važi i za relevantne procese koji se odvijaju u podsistemima samog radara – predajniku, anteni, prijemniku i procesoru signala, tj. na osnovu postojećeg znanja može se predvideti kako će ovi podsystemi uticati na signal. Prema tome, odgovori koji se traže u ovoj studiji, a koji se odnose na potvrđivanje ili opovrgavanje hipoteza od H1 do H4, ne zavise od nepoznatih osobina fizičkih procesa i sistema koji su predmet istraživanja. Stoga, u skladu sa stavovima savremenih filozofa nauke, podjednako je validno te odgovore tražiti pomoću eksperimenta ili simulacije. No, eksperimentalno ispitivanje navedenih hipoteza bilo bi veoma skupo, pa je u ovoj studiji izabrano da se do novog naučnog znanja dođe metodom simulacije.

Ostatak ove studije organizovan je kao što sledi. U drugom odeljku predstavljen je pregled postojeće literature u domenu optimizacije impulsne povorke impulsnog Dopler radara, kao i pregled dela literature o višeciljnoj optimizaciji koji je relevantan za ovu studiju. U trećem odeljku predstavljen je matematički model optimizacionog problema koji se razmatra u ovoj studiji, kao i istorijat razvoja pomenutog modela. U četvrtom odeljku predložen je aproksimativni algoritam za efikasno rešavanje optimizacionog problema, sa osvrtom na korake u razvoju algoritma. U petom odeljku najpre su predstavljeni rezultati evaluacije performansi aproksimativnog algoritma, a zatim su izvedeni zaključci o istinitosti polaznih hipoteza, praktičnoj primenljivosti predloženog algoritma i mogućnostima za dalja unapređenja algoritma. Zaključne napomene su sumirane u šestom odeljku, uključujući osvrt na rezultate i doprinose ove studije, moguće pravce daljeg istraživanja i značaj višeciljne optimizacije u inženjerstvu.

2 Pregled literature

Optimizacija impulsne povorke impulsnog Dopler radara je aktivno polje istraživanja, sa velikim brojem objavljenih radova. Mnogi od tih radova su u fokusu imali izbor skupa PRF, odnosno PRI, radi maksimizacije vidljivosti u domenu Doplerovih frekvencija. Osnovne preporuke za izbor skupa PRF mogu se pronaći u standardnim udžbenicima i monografijama u oblasti radara, kao što su [3] i [4].

Optimalan izbor skupa PRF za LPRF impulsne Dopler radare, među prvima je proučavao Rihaczek, 70-ih godina XX veka [6], [13]. U članku [6], Rihaczek je opisao proceduru za izbor skupa PRF, tako da se maksimizira interval u kojem su sve Doplerove frekvencije vidljive pri barem jednoj PRF. Podrazumevajući da se skup PRF bira po pomenutoj proceduri, Rihaczek je proučavao problem minimizacije vremena boravka cilja u snopu antene, pod ograničenjem zadate širine intervala u kojem su sve Doplerove frekvencije vidljive pri barem jednoj PRF, pri čemu je ukupan broj PRF u skupu tretiran kao promenljiva odlučivanja [6]. Zaključci studije [6] su da broj PRF u skupu može imati značajan uticaj na performanse radara, te da što je širi interval Doplerovih frekvencija u kojem treba obezbediti vidljivost bez prekida, to je potrebno više PRF u skupu da bi se minimiziralo vreme boravka. U svom narednom radu [13], Rihaczek je proširio problem uvodeći broj impulsa u CPI kao promenljivu odlučivanja, te predstavio formalizovan pristup za rešavanje problema. U svojim radovima, Rihaczek se usredsredio na optimizaciju koherentne uniformne povorke u okruženju u kojem je otkrivanje ograničeno klaterom. Problem koji je u suštini višeciljan, Rihaczek je sveo na jednociljan, obuhvativši vidljivost u domenu Doplerovih frekvencija kroz ograničenje.

90-ih godina XX veka, Stocker [14] je proučavao LPRF impulsne povorke sa impulsima različitih trajanja, uključujući i povorke sa učešljanim impulsima, u okruženju u kojem je otkrivanje ograničeno šumom, u cilju postizanja zadatih performansi otkrivanja pri ograničenoj vršnoj impulsnoj snazi. Stocker je vreme boravka objekta u snopu antene posmatrao kao cilj koji treba minimizirati, dok je ukupna energija na cilju u jednom CPI obuhvaćena kroz ograničenje. Stocker je takođe naveo da se najveći dobitak u odnosu na uniformnu povorku impulsa postiže učešljavanjem dve povorke impulsa, tj. korišćenjem impulsa sa dva različita trajanja [14].

Nedavno se Sedivy [15] bavio optimizacijom uniformne povorke u frekvencijski agilnom MTD radaru. Sedivy je proučavao povorku sa dve PRF, ali karakteristično je da je kao promenljive odlučivanja uzimao u obzir i učestanosti nosioca. Sedivy je kao cilj koji treba maksimizirati postavio prvu pravu slepu brzinu. U slučaju sa samo dve PRF maksimizacija prve prave slepe brzine ekvivalentna je maksimizaciji širine intervala Doplerovih frekvencija u kojem je obezbeđena vidljivost bez prekida.

Problem optimalnog izbora impulsne povorke u MPRF impulsnom Dopler radaru značajan je uglavnom u kontekstu multifunkcionalnih radara na lovačkim avionima. Pomenuti problem ima određene sličnosti sa problemom izbora impulsne povorke u LPRF impulsnom Dopler radaru, pa je stoga za ovu studiju relevantan i pregled literature na temu optimizacije MPRF talasnih oblika. Optimizacija u MPRF režimu je složenija nego u LPRF režimu, jer pored ponavljanja slepih zona na celobrojnim umnošcima PRF dolazi i do pojavljivanja zamračenih zona oko daljina različitih od nulte.

Sistematično proučavanje optimalnog izbora skupa PRF za MPRF impulsne Dopler radare počelo je nešto kasnije u odnosu na slična istraživanja u domenu LPRF radara. Među pionirskim radovima ističe se rad Simpson-a iz 90-ih godina XX veka [16]. Kriterijum koji je Simpson koristio za optimalan izbor skupa PRF je, u suštini, vidljivost u dvodimenzionalnom prostoru određenom daljinom i Doplerovom frekvencijom.

Veoma značajan napredak na polju optimalnog izbora skupa PRF za MPRF impulsne Dopler radare napravili su Davies i Hughes 2002. godine [17]. Ključno unapređenje koje su uveli pomenuti autori odnosi se na primenu evolutivnog algoritma za pronalaženje optimalnog skupa PRF. Slično kao i Simpson [16], Davies i Hughes [17] su kao cilj koji treba minimizirati postavili broj „slepih“ ćelija u prostoru daljina / Doplerova frekvencija. Zaključci studije [17] su da su evolutivni algoritmi izvodljiva i efikasna metoda za pronalaženje optimalnih skupova PRF u MPRF radaru, te da imaju potencijal za izvršavanje u realnom vremenu ili skoro u realnom vremenu što bi teoretski moglo omogućiti adaptaciju skupa PRF u skladu sa operativnim uslovima.

Nakon inovativnog rada [17], Hughes i njegovi saradnici objavili su niz nadovezujućih članaka. U radu [18], Alabaster, Hughes i Matthew proširili su optimizacioni problem dodavanjem novih ograničenja, koja se odnose na dekodabilnost, eliminaciju slepih brzina, i sl., te uvođenjem naprednijeg modela klatera u kontekstu avionskog radara za upravljanje vatrom. Za cilj koji treba minimizirati odabrali su procentualni udeo dela prostora daljina / Doplerova frekvencija od interesa u kojem je ostvarena vidljivost pri manje od 4 PRF. Vreme boravka cilja u snopu antene smatrali su konstantnim sa stanovišta optimizacionog problema.

U članku [19], Wiley, Parry, Alabaster i Hughes, proučavali su i poredili različite šeme promene PRF za MPRF radare, sa naglaskom na šeme koje zahtevaju manje različitih PRF od ranije proučavanih šema. Autori su i u ovom radu kao cilj koji treba minimizirati odabrali procentualni udeo dela prostora daljina / Doplerova frekvencija od interesa u kojem vidljivost nije dovoljna za otkrivanje objekata, ali su pored toga različite šeme promene PRF poredili i u odnosu na potencijal za „pojavu duhova“ (eng. ghosting), tj. lažnih objekata usled višeznačnosti određivanja daljine i

Doplerove frekvencije. Iako autori nisu eksplicitno proglasili verovatnoću pojave duhova kao cilj, ipak su je na neki način posmatrali kao cilj.

U svom radu iz 2007. godine [20], Hughes je postavio izbor skupa PRF za MPRF radar kao problem višeciljne optimizacije (eng. multi-objective optimization (MOO)), ili tačnije mnogociljne optimizacije (eng. many-objective optimization), obzirom da je identifikovano 9 ciljeva. Hughes je ciljevima obuhvatio vidljivost u prostoru daljina / Doplerova frekvencija, pojavu duhova, i potrebno vreme boravka objekta u snopu antene. Za inicijalno ispitivanje rešenja problema autor je koristio tri algoritma: *Non-dominated sorting genetic algorithm II* (NSGA-II), *Multiple single objective Pareto sampling* (MSOPS) i treći neimenovani algoritam koji je tada bio u razvoju. Sva tri algoritma su imala slične performanse, i proizvela slična rešenja, za koja je autor pretpostavio da su bliska stvarnom PF. Hughes je takođe sugerisao na mogućnost kombinovanja rešenja dobijenih različitim algoritmima i pronalaženje kompozitne aproksimacije PF, mada deluje da je u konkretnom slučaju odustao od toga zbog predugog trajanja takve operacije.

Optimizacija je oblast matematike, koja se odavno proučava, a i dalje je aktivna oblast istraživanja, zahvaljujući svojoj primenljivosti u brojnim drugim naučnim i tehničkim disciplinama. Dobar uvod u probleme optimizacije i metode za njihovo rešavanje predstavljen je u poglavljima 2 i 3 disertacije [21].

Optimizacioni problem u kojem sve promenljive odlučivanja imaju vrednosti iz konačnog ili prebrojivog diskretnog skupa, predstavlja kombinatorni optimizacioni problem [21]. Za detaljno upoznavanje sa oblašću kombinatorne optimizacije, čitalac se upućuje na udžbenik [22].

Višeciljna optimizacija podrazumeva rešavanje optimizacionih problema u kojima postoji više suprotstavljenih ciljeva (eng. objective) [21]. U literaturi se umesto termina višeciljna optimizacija koristi i termin višekriterijumska optimizacija (eng. multi-criteria optimization), a umesto termina cilj, termin kriterijum (eng. criterion). Pregledni rad Marler-a i Arora-e [9] predstavlja odličan izvor osnovnih informacija o višeciljnoj optimizaciji, sa osvrtom na primene u inženjerstvu. Za detaljnije upoznavanje sa oblašću višeciljne optimizacije, čitalac se upućuje na udžbenike koje su priredili Ehrgott [23] i Miettinen [24].

Među različitim metodama za rešavanje problema optimizacije, metaheurističke metode pokazale su se kao ekstremno efikasne u rešavanju realnih optimizacionih problema [21]. Najčešće korišćene metaheurističke metode uključuju i genetske algoritme (GA) [21], poznate i pod nazivom evolutivni algoritmi (EA). Genetski, odnosno evolutivni algoritmi inspirisani su biološkom evolucijom [21]. Više detalja o genetskim algoritmima može se pronaći u udžbeniku [25].

Skorašnji primeri uspešne primene evolutivnih algoritama na realne inženjerske probleme u oblasti elektronskih sistema uključuju formiranje slika kosmičkog otpada pomoću radara sa inverznom sintetičkom aperturom [26], detekciju pokretnih ciljeva i formiranje slika pomoću radara sa sintetičkom aperturom sa višestrukim frekventnim opsezima [27], te optimalan izbor strategija pretraživanja u sistemu za elektronsko izviđanje [28].

Evolutivna višeciljna optimizacija (eng. evolutionary multi-objective optimization (EMO)) podrazumeva primenu evolutivnih algoritama na rešavanje problema višeciljne optimizacije. Osnovne informacije o ovom etabliranom polju istraživanja mogu se naći u poglavlju 3 tematskog zbornika [29], koje je priredio Kalyanmoy Deb, eminentan član EMO zajednice.

Višeciljni evolutivni algoritam (eng. multi-objective evolutionary algorithm (MOEA)) je široko prihvaćen termin za postupak rešavanja višeciljnog optimizacionog problema zasnovan na evolutivnom algoritmu. Za upoznavanje sa poznatim višeciljnim evolutivnim algoritmima, uključujući njihovo međusobno poređenje, koristan je članak [30]. Nešto noviji pregled oblasti višeciljnih evolutivnih algoritama raspoloživ je u članku [31].

Na kraju pregleda literature o višeciljnim evolutivnim algoritmima, vredi izdvojiti jedan od njih – NSGA-II [32]. U studiji [30], NSGA-II je opisan kao dobro testiran i efikasan algoritam. Sudeći po studiji [31], NSGA-II je popularan algoritam koji je primenjivan u mnogim vrstama problema iz stvarnog sveta koje su autori uvrstili u pregled. NSGA-II je primenjivan i u oblasti radarskog inženjerstva. U radu [33] NSGA-II je primenjen na problem upravljanja resursima u radaru sa oportunističkim digitalnim antenskim nizom. U disertaciji [34] višeciljni optimizacioni problem projektovanja talasnog oblika za radar u području visokih frekvencija sa površinskim talasom, rešen je uz pomoć NSGA-II. U ranije pomenutoj studiji [20] Hughes je koristio NSGA-II kao referentni algoritam za mnogociljni problem projektovanja MPRF talasnog oblika za avionski radar.

Kod određenih klasa kombinatornih višeciljnih problema, javljaju se problemi preklopljenih, tj. višestrukih istih rešenja (eng. overlapped solutions) kada se za rešavanje koristi NSGA-II. Pomenuti problemi su detaljno analizirani u radovima [35] i [36].

3 Matematički model

Za precizno opisivanje optimizacionih problema koriste se matematički modeli [37]. Matematički model optimizacionog problema sastoji se od [37]:

- Promenljivih odlučivanja (eng. decision variable ili design variable),
- Ograničenja, tj. uslova (eng. constraint),
- Funkcija cilja (eng. objective function).

U kontekstu optimizacionih problema, rešenje je vektor promenljivih odlučivanja. Dopustivo rešenje (eng. feasible solution) je rešenje koje zadovoljava sva ograničenja [37]. Dopustivi prostor odlučivanja (eng. feasible decision space ili feasible design space) je skup svih dopustivih rešenja [9]. Dopustivi prostor odlučivanja je deo višedimenzionalnog prostora koji čine sva rešenja i čija dimenzionalnost je jednaka broju promenljivih odlučivanja.

Ograničenja se matematički mogu izraziti kao jednakosti ili nejednakosti [9].

U višeciljnom optimizacionom problemu postoji više funkcija cilja. Dopustivi prostor ciljeva (eng. feasible objective space) definisan je preslikavanjem dopustivog prostora odlučivanja pomoću vektora funkcija cilja.

U jednociljnom optimizacionom problemu, optimalno rešenje je dopustivo rešenje koje optimizuje funkciju cilja [37]. Optimizacija funkcije cilja podrazumeva minimizaciju ili maksimizaciju, pri čemu se jedno lako može svesti na drugo negacijom funkcije cilja.

U višeciljnom optimizacionom problemu tipično na postoji jedno optimalno rešenje, već skup rešenja koja zadovoljavaju određenu definiciju optimalnosti [9]. Preovlađujući koncept za definisanje optimalnosti u višeciljnim optimizacionim problemima je koncept Pareto optimalnosti [9]. Dopustivo rešenje je Pareto optimalno ako i samo ako ne postoji drugo dopustivo rešenje koje poboljšava optimalnost barem jedne funkcije cilja, a da pri tome ne kvvari optimalnost ostalih funkcija cilja [9]. Koncepti efikasnosti (eng. efficiency) i nedominiranosti (eng. nondominance) se u praksi mogu smatrati istovetnim Pareto optimalnosti [9], sa tim da se nedominiranost definiše u odnosu na vektore funkcija cilja, a ne rešenja [9]. Skup Pareto optimalnih (PO) rešenja je Pareto optimalan skup [9] (POS). Pareto front (PF) je projekcija POS na dopustivi prostor ciljeva. U ovoj studiji termini PO i nedominirano koristiće se kao sinonimi.

Preferencije (eng. preference) se odnose na stavove donosioca odluke o tačkama u dopustivom prostoru ciljeva [9]. Na osnovu preferencija donosilac odluke bira jedno PO rešenje iz POS, koje je po njemu najprikladnije za datu situaciju. U pogledu artikulacije preferencija, metode višeciljne optimizacije se klasifikuju na sledeći način [9], [24]:

- metode sa a posteriori artikulacijom preferencija [9] – donosilac odluke nameće svoje preferencije, tj. bira najprikladnije rešenje, imajući na raspolaganju POS i PF kao rezultate procesa optimizacije, pri čemu svoj stav formira na osnovu PF;
- metode sa a priori artikulacijom preferencija [9] – donosilac odluke nameće svoje preferencije bez uvida u PF, najčešće putem kvantifikacije relativnog značaja pojedinačnih funkcija cilja, anticipirajući da će jedno rešenje koje je rezultat procesa optimizacije biti prikladno u odnosu na njegove stavove;
- metode bez artikulacije preferencija [9] – ne zahtevaju nikakvu artikulaciju preferencija, pa su stoga pogodne kada donosilac odluke nije siguran šta preferira, a većinom predstavljaju pojednostavljene metode sa a priori artikulacijom preferencija [9] i samim time kao rezultat procesa optimizacije daju jedno rešenje.

Matematički model višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB evoluirao je kroz nekoliko stadijuma:

- Inicijalna verzija matematičkog modela objavljena je 2015. godine u zborniku [38], a u nastavku biće označena sa M15;
- Unapređena verzija matematičkog modela objavljena je 2017. godine u tematskom zborniku [39] i u daljem tekstu biće označena kao M17;
- Dodatno usavršena i u ovom trenutku finalna verzija matematičkog modela predstavljena je 2019. godine u članku [40], a nadalje će biti označena sa M19.

U nastavku ovog poglavlja biće detaljno predstavljene matematički modeli M15, M17 i M19, uz objašnjenje njihovih međusobnih razlika.

Takođe će biti pokazano da se problem izbora MPCIPB može svesti na kombinatorni optimizacioni problem, kada se uzmu u obzir praktični aspekti implementacije generatora radarskog signala. Zahvaljujući kombinatornoj prirodi problema, dopustivi prostor odlučivanja biće diskretan, a zahvaljujući ograničenjima ukupan broj dopustivih rešenja biće konačan. Imajući u vidu konačnost skupa dopustivih rešenja, moguće je egzaktno odrediti POS metodom iscrpne pretrage (eng. exhaustive search). U današnje vreme, iscrpna pretraga može predstavljati razumnu opciju za rešavanje optimizacionih problema, pod uslovom da prostor koji treba pretražiti nije prevelik [41].

U ovom poglavlju će za svaki od predstavljenih modela biti određeni egzaktni POS i PF, za jedan skup parametara modela, metodom iscrpne pretrage. Na ovaj način dobijeni rezultati omogućiće bolje razumevanje matematičkih modela i njihovih međusobnih razlika, ali i poslužiti kao referenca za evaluaciju performansi aproksimativnog algoritma za rešavanje optimizacionog problema, u narednim odeljcima.

Određene pretpostavke su zajedničke za sve modele, pa će biti iznete pre predstavljanja samih modela:

- Radar koji se modeluje skenira prostor mehaničkim okretanjem antene konstantnom ugaonom brzinom, što za posledicu ima da je vreme boravka cilja u glavnom snopu antene konstantno, određeno širinom glavnog snopa i ugaonom brzinom okretanja;
- Broj EW, a time i PRI, unutar CPI n_p ima istu vrednost u svim CPI, što za posledicu ima da je dobitak usled koherentne integracije isti u svim CPI, ali rezolucija po radialnoj brzini nije ista u svim CPI;
- Broj CPI tokom boravka cilja u glavnom snopu antene nije manji od broja različitih PRF N , tako da se za svaki cilj mogu primiti odbijeni signali pri svim PRF.

3.1 Matematički model M15

Matematički model M15 predstavlja inicijalnu verziju matematičkog modela višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB. Objavljen je u [38]. U ovom odeljku najpre će biti predstavljen M15 sa detaljima izvođenja. Nakon toga će M15 biti primenjen na konkretnom primeru koji bi mogao da odgovara hipotetičkom savremenom radaru u području veoma visokih frekvencija (eng. very high frequency (VHF)). Biće analizirana zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja, a zatim će metodom iscrpne pretrage biti određeni egzaktni POS i PF. Na osnovu egzaktnih POS i PF razmotriće se kakve bi opcije donosilac odluke mogao da ima u artikulaciji svojih preferencija, u ovom slučaju a posteriori.

3.1.1 Prikaz matematičkog modela M15

Pre formulisanja M15, treba napomenuti da u ovom matematičkom modelu postoje odstupanja od funkcija cilja koje su neformalno definisane u uvodu. Naime, u M15 rezolucija po radialnoj brzini ne figuriše kao funkcija cilja. Pored toga, funkcija cilja koja se odnosi na vidljivost u domenu Doplerovih frekvencija ne zasniva se na proračunu vidljivosti već na pokazatelju koji predstavlja indirektnu procenu vidljivosti.

Kao što je već pomenuto u uvodu, veličine koje potpuno definišu MPCIPB su:

- trajanje kratkog impulsa, τ_S ,
- trajanje dugog impulsa, τ_L ,
- kašnjenje uzlazne ivice dugog impulsa u odnosu na uzlaznu ivicu kratkog impulsa, ΔPRI_S ,
- broj PRI ili EW unutar jednog CPI, n_p ,
- broj različitih PRF, a time i PRI, N ,
- skup PRI, $\{PRI_n | n = 1, \dots, N\}$.

Navedene veličine bi se mogle koristiti direktno kao promenljive odlučivanja. Broj promenljivih odlučivanja bio bi u tom slučaju $5 + N$. Pošto se inače smatra da dobri modeli imaju mali broj promenljivih odlučivanja [37], potrebno je razmotriti da li je moguće redukovati kardinalnost skupa promenljivih odlučivanja.

Razmotrimo pre svega broj različitih PRF N . Jedan od problema sa N kao promenljivom odlučivanja je to što kardinalnost skupa promenljivih odlučivanja zavisi od jedne od promenljivih odlučivanja. U mnogim studijama, kao što su [15], [17], [18], [19] i [20], N se ne smatra promenljivom odlučivanja, već parametrom modela koji je sa stanovišta optimizacije konstantan. Sa druge strane, Rihaczek [6], [13] je posmatrao N kao promenljivu odlučivanja i zaključio da što je širi interval Doplerovih frekvencija u kojem treba obezbediti vidljivost bez prekida, to je potrebno veće N da bi se minimiziralo vreme boravka cilja u snopu antene. Kao što se iz prethodnog može videti, postoje argumenti i za i protiv korišćenja N kao promenljive odlučivanja, ali je ipak odlučeno da se u M15 N ne smatra promenljivom odlučivanja, već jednim od parametara modela.

Vreme boravka cilja u glavnom snopu antene jednako je količniku trodecibelske širine glavnog snopa antene θ_3 i ugaone brzine okretanja antene ω . Sa druge strane, ukupno trajanje MPCIPB jednako je $n_p \cdot N \cdot PRI_{avg}$, gde je PRI_{avg} srednja vrednost PRI, definisana u (1).

$$PRI_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N PRI_n \quad (1)$$

Ukupno trajanje MPCIPB ne sme biti duže od vremena boravka cilja u glavnom snopu. Iz tog uslova uz jednostavne matematičke transformacije sledi (2).

$$n_p \leq \frac{\theta_3}{\omega \cdot PRI_{avg} \cdot N} \quad (2)$$

Faktor koherentne integracije jednak je broju PRI unutar jednog CPI n_p . Da bi se ostvario maksimalan moguć stepen koherentne integracije, optimalno je da n_p ima maksimalnu moguću vrednost koja zadovoljava uslov (2). Sa obzirom na to da je n_p prirodan broj, optimalna vrednost za n_p je izražena u (3).

$$n_p = \left\lfloor \frac{\theta_3}{\omega \cdot PRI_{avg} \cdot N} \right\rfloor \quad (3)$$

Na osnovu prethodnog izlaganja može se zaključiti da n_p nije promenljiva odlučivanja u predmetnom problemu, već funkcija drugih promenljivih odlučivanja, tj. skupa PRI.

Uloga kašnjenja uzlazne ivice dugog impulsa u odnosu na uzlaznu ivicu kratkog impulsa ΔPRI_S je da obezbedi da emitovanje dugog impulsa ne počne pre nego što se završi prijem sa najveće daljine koja će biti zamračena tokom emitovanja dugog impulsa. Stoga kašnjenje ne sme da bude kraće od trajanja dugog impulsa. Sa druge strane, produžavanjem kašnjenja preko trajanja dugog impulsa ne dobija se ništa u pogledu optimizacije ciljeva definisanih u uvodnom poglavlju, a smanjuje se ukupna energija kojom se „osvetljava“ cilj tokom njegovog boravka u glavnom snopu. Prema tome, optimalno je da kašnjenje bude $\Delta PRI_S = \tau_L$. Dakle, ni ΔPRI_S nije promenljiva odlučivanja, već funkcija jedne od promenljivih odlučivanja.

Trajanje kratkog impulsa τ_S ne utiče direktno na ciljeve definisane u uvodnom poglavlju, pa stoga nije promenljiva odlučivanja u kontekstu predmetnog problema. Međutim, τ_S se mora odrediti da bi MPCIPB bio potpuno definisan. Zato je neophodno utvrditi na koji način ova veličina utiče na optimizacioni problem. Označimo sa SNR_L odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na instrumentalnoj daljini R_I „osvetli“ dugim impulsom. Neka je R_E maksimalna daljina koja je zamračena tokom emitovanja dugog impulsa. Označimo zatim sa SNR_S odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na daljini R_E „osvetli“ kratkim impulsom. SNR_S mora biti dovoljno visok da bi se obezbedile adekvatne performanse otkrivanja na daljini R_E , što se može postići izborom τ_S . Pošto u predmetnom problemu SNR_S , za razliku od SNR_L , nije cilj koji se optimizuje, mora se uzeti u obzir na drugi način. Neka je Q_{SNR} minimalan dozvoljen odnos SNR_S i SNR_L , definisan u (4).

$$\frac{SNR_S}{SNR_L} \geq Q_{SNR}, \quad Q_{SNR} \geq 1 \quad (4)$$

Stocker [14] je pretpostavio $Q_{SNR} = 1$, što bi značilo da su performanse detekcije na R_E iste kao na R_I . Međutim, u praksi mogu biti od interesa i vrednosti Q_{SNR} veće od 1, jer minimalne prihvatljive performanse otkrivanja ne moraju biti iste na R_E i R_I .

Izraz za SNR, poznat i kao jedan od oblika radarske jednačine, naveden je u (5), a preuzet je iz [4], jed. (2.29). U ovoj jednačini P_t je vršna snaga emitovanog signala, G je dobitak antene, λ je talasna dužina nosioca, σ je radarska površina objekta (eng. radar cross section (RCS)), β je širina frekvencijskog opsega unutar-impulsne modulacije, R je daljina objekta, k je Bolcmanova konstanta, T_0 je standardna temperatura, F je faktor šuma prijemnika, B je širina propusnog opsega prijemnika, a L_S su sistemski gubici.

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma n_p}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F B L_S} \cdot \tau \beta \quad (5)$$

R_E se može izraziti kao (6), gde je c brzina svetlosti.

$$R_E = (\tau_L c)/2 \quad (6)$$

Kombinovanjem (4), (5) i (6) i rearanžiranjem dobija se nejednakost (7).

$$\tau_S \geq Q_{SNR} \cdot \left(\frac{\tau_L c}{2R_I}\right)^4 \cdot \tau_L \quad (7)$$

Označimo sa R_{min} minimalnu daljinu od interesa. Da bi se obezbedilo da ova daljina nije zamračena tokom emitovanja kratkog impulsa, mora biti zadovoljena nejednakost (8).

$$\tau_S \leq \frac{2R_{min}}{c} \quad (8)$$

Kao što je već rečeno, trajanje kratkog impulsa nije promenljiva odlučivanja, ali zavisi od jedne od promenljivih odlučivanja. Kada se procesom optimizacije odredi τ_L , za τ_S se može odabrati bilo koja vrednost koja zadovoljava uslove (7) i (8).

Preostale veličine koje definišu MPCIPB su trajanje dugog impulsa i skup PRI. Ako se ove veličine usvoje kao promenljive odlučivanja, ukupan broj promenljivih odlučivanja bio bi $1 + N$. Prema Rihaczek-u, od primarnog interesa su vrednosti $N \in \{2,3,4\}$ [6], tako da bi za predmetni problem ukupan broj promenljivih odlučivanja bio između 3 i 5, u zavisnosti od vrednosti parametra N . U cilju dalje redukcije skupa promenljivih odlučivanja, od interesa je ispitati mogućnost zamene celog skupa PRI drugim promenljivama odlučivanja, koje bi indirektno definisale skup PRI. Broj zamenskih promenljivih odlučivanja ne bi smeo da bude veći od 2, što je minimalna kardinalnost skupa PRI.

U [3] je preporučeno da se PRI biraju kao u (9), gde ćemo činilac r_n nazvati promenljivi faktor PRI. F_B je frekvencija koja je jednaka prvoj pravoj slepoj Doplerovoj frekvenciji, ako su promenljivi faktori PRI r_n uzajamno prosti, tj. najveći zajednički delilac im je 1.

$$PRI_n = (1/F_B) \cdot r_n, \quad r_n \in \mathbb{N}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Bez gubitka opštosti promenljive faktore PRI možemo izraziti kao u (10). U ovom izrazu, r^* ima smisao željene (ciljane) srednje vrednosti skupa promenljivih faktora PRI, pa je prema tome željena srednja vrednost PRI PRI_{avg}^* opisana izrazom (11). Kada bi se u impulsnoj povorci koristio samo jedan PRI, čija je vrednost jednaka PRI_{avg}^* , prva prava slepa Doplerova frekvencija bila bi $1/PRI_{avg}^* = F_B/r^*$, tj. r^* puta manja nego kada se koristi MPCIPB sa istim srednjim PRI. Prema tome, r^* ima značenje željenog povećanja prve prave slepe Doplerove frekvencije. U izrazu (10), sabirak Δr_n nazvaćemo odstupanje promenljivog faktora PRI. Skup odstupanja promenljivih faktora PRI Δr definisan je u (12), zajedno sa statistikama koje su od značaja za dalje izlaganje. Skup

odstupanja promenljivih faktora PRI definiše kako su PRI raspoređeni oko željene srednje vrednosti.

$$r_n = r^* + \Delta r_n, \quad r^* \in \mathbb{N}, \quad \Delta r_n \in \mathbb{Z}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$PRI_{avg}^* = (1/F_B) \cdot r^* \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta r &= \{\Delta r_n | n = 1, \dots, N\}, \quad \Delta r_{\min} = \min(\Delta r) \\ \Delta r_{\max} &= \max(\Delta r), \quad \Delta r_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta r_n \end{aligned} \quad (12)$$

Za neku vrednost parametra N postoji mnogo načina da se izabere Δr . Međutim, u [3], na str. 2.41 i 2.91 preporučena je jedna šema izbora Δr , za koju se tvrdi da je primenljiva i na radare sa MTD procesorom. Šema predložena u [3] definiše zavisnost Δr od N , doduše samo za neke vrednosti N , kao što je prikazano u Tab. 1. U fusnoti na str. 2.41 u [3] objašnjeno je da navedena šema daje dobre rezultate jer sortirani niz svih međusobnih razlika Δr_n predstavlja „savršen niz“ uzastopnih brojeva. Po tom principu mogli bi da se odrede Δr i za druge vrednosti N .

Tab. 1 – Skupovi odstupanja promenljivih faktora PRI sa osnovnim statistikama, prema [3]. [Adapted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 \[40\].](#)

N	Δr	Δr_{\min}	Δr_{\max}	Δr_{avg}
4	{-3,+2,-1,+3}	-3	+3	0.25
5	{-6,+5,-4,+4,+1}	-6	+5	0

Kombinovanjem izraza (9) i (10), dobija se (13).

$$PRI_n = (1/F_B) \cdot (r^* + \Delta r_n), \quad r^* \in \mathbb{N}, \quad \Delta r_n \in \mathbb{Z}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

Ako sa PRI_{\min} označimo najkraći PRI u skupu PRI, onda na osnovu (13) važi i (14).

$$PRI_{\min} = (1/F_B) \cdot (r^* + \Delta r_{\min}) \quad (14)$$

Deljenjem prethodna dva izraza i rearanžiranjem, dobija se (15). Prema tome, svaki PRI u skupu PRI može se izraziti kao funkcija r^* i PRI_{\min} , odnosno ceo skup PRI je jednoznačno određen sa ove dve veličine.

$$PRI_n = \frac{r^* + \Delta r_n}{r^* + \Delta r_{\min}} \cdot PRI_{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

Kombinovanjem (1), (12) i (15) dobija se (16). Treba obratiti pažnju na to da su Δr_n , Δr_{min} , Δr_{max} i Δr_{avg} funkcije parametra N , što je izostavljeno u notaciji zbog čitljivosti.

$$PRI_{avg} = \frac{r^* + \Delta r_{avg}}{r^* + \Delta r_{min}} \cdot PRI_{min} \quad (16)$$

Prethodno opisanim transformacijama zamenili smo ceo skup PRI sa dve promenljive odlučivanja koje ga indirektno određuju, tako da preostaju samo tri promenljive odlučivanja:

- željeno povećanje prve prave slepe Doplerove frekvencije, r^* ,
- trajanje dugog impulsa, τ_L ,
- najkraći PRI u skupu PRI, PRI_{min} .

Formalne definicije promenljivih odlučivanja x_1 , x_2 i x_3 , kao i vektora promenljivih odlučivanja \mathbf{x} za M15 navedene su u (17). Promenljiva x_1 je prirodan broj, a x_2 i x_3 su pozitivni realni brojevi. Međutim, u praktičnoj implementaciji generatora radarskog signala, vrednosti x_2 i x_3 , koje predstavljaju vremenske intervale, dobijale bi se celobrojnim umnožavanjem periode sistemskog takt signala. Prema tome, sa stanovišta optimizacije promenljive x_2 i x_3 su elementi diskretnih podskupova skupa pozitivnih realnih brojeva. Shodno tome, prema M15, problem izbora MPCIPB je kombinatorni optimizacioni problem. Korake diskretizacije promenljivih τ_L i PRI_{min} označićemo sa τ_{STEP} i PRI_{STEP} , respektivno.

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv r^*, & x_2 &\equiv \tau_L, & x_3 &\equiv PRI_{min} \\ \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \end{aligned} \quad (17)$$

Kombinovanjem izraza (7) i (8) dobija se (18), čijim rearanžiranjem se dobija izraz (19). Ovaj izraz predstavlja ograničenje za trajanje dugog impulsa da bi se sprečila situacija u kojoj nije moguće izabrati trajanje kratkog impulsa tako da budu zadovoljena oba uslova (7) i (8).

$$\frac{2R_{min}}{c} \geq Q_{SNR} \cdot \left(\frac{\tau_L c}{2R_I}\right)^4 \cdot \tau_L \quad (18)$$

$$\tau_L \leq \sqrt[5]{\frac{1}{Q_{SNR}} \cdot \frac{2R_{min}}{c} \cdot \left(\frac{2R_I}{c}\right)^4} \quad (19)$$

Da bi se osiguralo jednoznačno merenje daljine do instrumentalne daljine, tj. rad u LPRF režimu, mora važiti (20), gde je ΔPRI_{Ln} interval od uzlazne ivice dugog impulsa do kraja elementarnog talasnog oblika (videti Sl. 1). Ako se na obe strane nejednakosti (20) doda τ_L , i uzme u obzir da je $\Delta PRI_S = \tau_L$, a $PRI_n = \Delta PRI_S + \Delta PRI_{Ln}$ (videti Sl. 1), dobija se (21).

$$\Delta PRI_{Ln} \geq \frac{2R_I}{c}, \quad n = 1, \dots, N \quad (20)$$

$$PRI_n \geq \frac{2R_I}{c} + \tau_L, \quad n = 1, \dots, N \quad (21)$$

Nejednakost (21) će biti zadovoljena za svaki PRI ako i samo ako je zadovoljena za najkraći PRI PRI_{min} , pa je stoga konačna forma ograničenja koje obezbeđuje rad u LPRF režimu navedena u (22).

$$PRI_{min} \geq \frac{2R_I}{c} + \tau_L \quad (22)$$

Ako sa D označimo maksimalan dozvoljen faktor popune, onda mora važiti uslov (23).

$$\tau_S + \tau_L \leq D \cdot PRI_n, \quad n = 1, \dots, N \quad (23)$$

Uslov (23) će biti zadovoljen za svaki PRI ako i samo ako je zadovoljen za PRI_{min} . Pored toga, za većinu praktičnih sistema opravdana je pretpostavka $\tau_S \ll \tau_L$, pa je konačan oblik ograničenja koje osigurava da se ne prekorači maksimalan dozvoljen faktor popune iskazan u (24).

$$\tau_L \leq D \cdot PRI_{min} \quad (24)$$

Ako je v_{max} apsolutna vrednost maksimalne radijalne brzine od interesa, onda $\Delta f_{ua} = 4v_{max}/\lambda$ označava opseg frekvencija, u kojem ne sme biti pravih slepih Doplerovih frekvencija. U tom kontekstu, potrebno je da važi uslov $F_B \geq \Delta f_{ua}$. Kombinovanjem ovog uslova sa (14), dolazi se do uslova (25).

$$PRI_{min} \leq \frac{r^* + \Delta r_{min}}{\Delta f_{ua}} \quad (25)$$

Kombinovanjem (25) i (22), a imajući u vidu da $\tau_L \geq 0$, dolazi se do dodatnog ograničenja (26), koje zajedno sa ograničenjem (25) obezbeđuje da u opsegu radijalnih brzina od interesa ne bude pravih slepih brzina.

$$r^* \geq \Delta f_{ua} \cdot \frac{2R_I}{c} - \Delta r_{min} \quad (26)$$

Dopustivi prostor odlučivanja \mathbf{X} za M15, određen sa 5 ograničenja tipa nejednakosti, formalno je definisan u (27). Pet funkcija ograničenja, od $g_1(\mathbf{x})$ do $g_5(\mathbf{x})$, dobijene su rearanžiranjem izraza (26), (19), (22), (24) i (25), respektivno.

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, 5\} \quad (27)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = r^* - \Delta f_{ua} \cdot \frac{2R_I}{c} + \Delta r_{min}$$

$$\begin{aligned}
g_2(\mathbf{x}) &= \sqrt[5]{\frac{1}{Q_{SNR}} \cdot \frac{2R_{min}}{c} \cdot \left(\frac{2R_I}{c}\right)^4} - \tau_L \\
g_3(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{2R_I}{c} - \tau_L \\
g_4(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{1}{D} \cdot \tau_L \\
g_5(\mathbf{x}) &= \frac{r^* + \Delta r_{min}}{\Delta f_{ua}} - PRI_{min}
\end{aligned}$$

Prva funkcija cilja je SNR_L , tj. odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na instrumentalnoj daljini „osvetli“ dugim impulsom. Ova funkcija cilja odgovara prvom od ciljeva koji su identifikovani u uvodnom poglavlju. Na osnovu radarske jednačine (5), izraz za SNR_L naveden je u (28).

$$SNR_L = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma n_p \tau_L \beta}{(4\pi)^3 R_I^4 k T_0 F L_S} \quad (28)$$

Ako se pretpostavi da se u prijemniku vrši podešeno filtriranje (eng. matched filtering), širina propusnog opsega prijemnika B i širina frekvencijskog opsega unutar-impulsne modulacije β će biti približno jednaki, pa će se međusobno poništavati, što nas dovodi do izraza (29).

$$SNR_L = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma n_p \tau_L}{(4\pi)^3 R_I^4 k T_0 F L_S} \quad (29)$$

U izrazu (29) postoje članovi koji ne zavise od promenljivih odlučivanja već isključivo od parametara modela i fizičkih konstantni. Pomenuti članovi su spram rešavanja optimizacionog problema konstantni. Zbog čitljivosti, pogodno je ove članove izdvojiti u poseban član koji je označen kao C_{SNR} , a definisan u (30).

$$C_{SNR} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_I^4 k T_0 F L_S} \quad (30)$$

Kombinovanjem izraza (3) i (16), dolazi se do (31).

$$n_p = \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right] \quad (31)$$

Kombinovanjem (29), (30) i (31) dobija se (31), što je konačan izraz za SNR_L .

$$SNR_L = C_{SNR} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right] \cdot \tau_L \quad (32)$$

Vidljivost u domenu Doplerovih frekvencija (Doplerova vidljivost) je drugi cilj identifikovan u uvodnom poglavlju. U zavisnosti od širine spektra klatera i izabranog skupa PRI, moguće je da postoje zone spektra koje su slepe pri svim PRI, što direktno smanjuje Doplerovu vidljivost, pa je od interesa da se ovakve zone eliminišu ili da se barem minimizira njihovo prisustvo u opsegu Doplerovih frekvencija od interesa. Odnos maksimalnog i minimalnog PRI u skupu PRI utiče na Doplerovu vidljivost. U [3], na str. 2.46, odnos maksimalnog i minimalnog PRI označen je sa γ i grafički je prikazano kako ovaj odnos utiče na dubine nula u spektralnom odzivu filtra, a time i na Doplerovu vidljivost, u radaru sa filtriranjem u vremenskom domenu (eng. moving target indication (MTI)). Takođe u [3], na str. 4.33, navedeno je da u MPRF radaru raspon PRF u skupu PRF treba da obuhvati skoro jednu oktavu radi ostvarivanja dobre Doplerove vidljivosti. Uticaj γ na Doplerovu vidljivost je i intuitivno jasan, jer što je manji γ , to su PRI, a time i PRF, bliži jedni drugima, pa je veća šansa da dođe do delimičnog preklapanja slepih zona koje potiču od pojedinačnih PRF. Ako spektralne karakteristike klatera nisu poznate, γ može biti korišćen kao aproksimativni indikator Doplerove vidljivosti, barem u smislu da će povećavanje γ načelno voditi ka smanjenju zastupljenosti zona koje su slepe pri svim PRI.

Za drugu funkciju cilja u M15 izabran je odnos maksimalnog i minimalnog PRI u skupu PRI γ , kao aproksimativni indikator Doplerove vidljivosti. Na osnovu (16) važi i (33).

$$PRI_{max} = \frac{r^* + \Delta r_{max}}{r^* + \Delta r_{min}} \cdot PRI_{min} \quad (33)$$

Ako se obe strane jednakosti (33) podele sa PRI_{min} , a imajući u vidu da je po definiciji $\gamma = PRI_{max}/PRI_{min}$, dobija se (34), što je i konačni izraz za γ .

$$\gamma = \frac{r^* + \Delta r_{max}}{r^* + \Delta r_{min}} \quad (34)$$

Formalne definicije funkcija cilja $F_1(\mathbf{x})$ i $F_2(\mathbf{x})$, kao i vektora funkcija cilja $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ za M15 navedene su u (35).

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{x}) &\equiv SNR_L = C_{SNR} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right] \cdot \tau_L \\ F_2(\mathbf{x}) &\equiv \gamma = \frac{r^* + \Delta r_{max}}{r^* + \Delta r_{min}} \\ \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [F_1(\mathbf{x}) \quad F_2(\mathbf{x})]^T \end{aligned} \quad (35)$$

Dopustivi prostor ciljeva \mathbf{Z} za M15 definisan je u (36).

$$\mathbf{Z} = \{\mathbf{F}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\} \quad (36)$$

Ovim je potpuno definisan matematički model M15 višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB. Sam višeciljni optimizacioni problem definisan je u (37).

$$\mathbf{x}^* = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} F(\mathbf{x}) \text{ s. t. } g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (37)$$

3.1.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M15, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija

Analizom funkcija cilja u (35) može se načelno predvideti kako će promenljive odlučivanja uticati na funkcije cilja. U Tab. 2 prikazano je kako očekujemo da će se menjati vrednosti funkcija cilja kada se povećavaju vrednosti promenljivih odlučivanja. Očigledno je da između funkcija cilja postoji konflikt kada se menja vrednost promenljive x_1 , što nagoveštava da optimalno rešenje \mathbf{x}^* problema definisanog u (37) neće biti jedinstveno, već će postojati više PO rešenja.

Tab. 2 – Očekivana zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja. Prevedeno iz [38].

	$x_1 \equiv r^* \uparrow$	$x_2 \equiv \tau_L \uparrow$	$x_3 \equiv PRI_{\min} \uparrow$
$F_1(\mathbf{x}) \equiv SNR_L$	↑ (stepenice)	↑	↓ (stepenice)
$F_2(\mathbf{x}) \equiv \gamma$	↓	(nema uticaja)	(nema uticaja)

Kao što je ranije rečeno, sve promenljive odlučivanja uzimaju vrednosti iz diskretnih skupova. Sve tri promenljive odlučivanja po prirodi su pozitivne, tako da je izvesno da su ograničene sa donje strane. Promenljiva τ_L ograničena je sa gornje strane nejednakošću (19), a promenljiva PRI_{\min} ograničena je sa gornje strane nejednakošću (25). Promenljiva r^* međutim nije ograničena sa gornje strane, pa iako je dopustivi prostor odlučivanja diskretan, ukupan broj tačaka u njemu je beskonačan, što otežava analizu i pretraživanje. Ipak, ako se pogledaju izrazi za obe funkcije cilja, vidi se da kako r^* raste, njen uticaj na obe funkcije cilja je sve manji, jer obe sadrže članove koji teže jedinici kada $r^* \rightarrow \infty$. Zato deluje da ima smisla veštački ograničiti r^* sa gornje strane, jer se pretpostavlja da se u delu dopustivog prostora odlučivanja koji odgovara visokim vrednostima r^* neće pronaći optimalna rešenja koja se značajno razlikuju od onih pronađenih pri nižim vrednostima r^* . Pomenuto ograničenje za r^* nije posledica fundamentalnih karakteristika problema, već samo olakšica za sprovođenje procesa optimizacije. Zato ovo ograničenje nije svrstano zajedno sa ograničenjima u (27). Označimo gornji limit za r^* sa r_{UL}^* , tako da za potrebe praktične primene matematičkog modela M15 mora da važi $r^* \leq r_{UL}^*$.

Sledi detaljnija analiza M15 putem numeričke simulacije, na konkretnom primeru hipotetičkog savremenog VHF radara. Usvojeni parametri M15 navedeni su u Tab. 3.

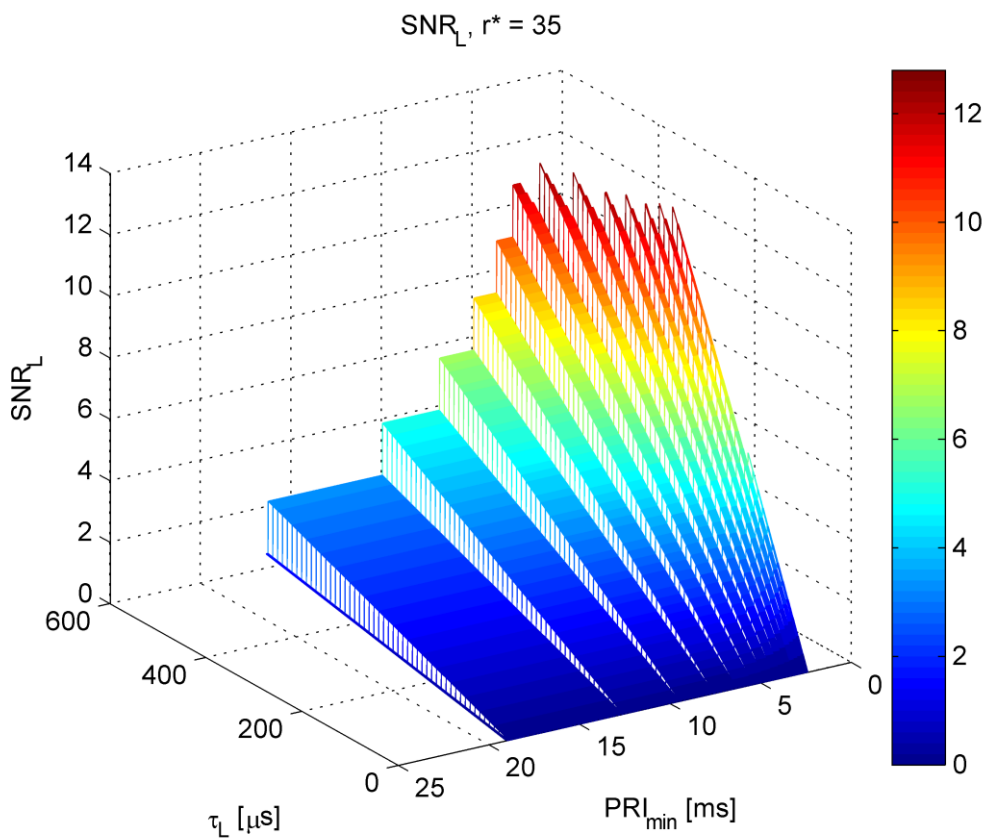
Tab. 3 – Parametri matematičkog modela M15 koji odgovaraju hipotetičkom savremenom VHF radaru

<i>Parametar</i>	<i>Vrednost</i>
P_t	8 kW
G	426
λ	1.6667 m
T_0	290 K
θ_3	6 °
ω	36 °/s
F	1.6965
L_S	26.3027
σ	5 m ²
R_{min}	1.5 km
R_I	360 km
v_{max}	700 m/s
D	0.1
Q_{SNR}	10
N	4
τ_{STEP}	10 μs
PRI_{STEP}	10 μs

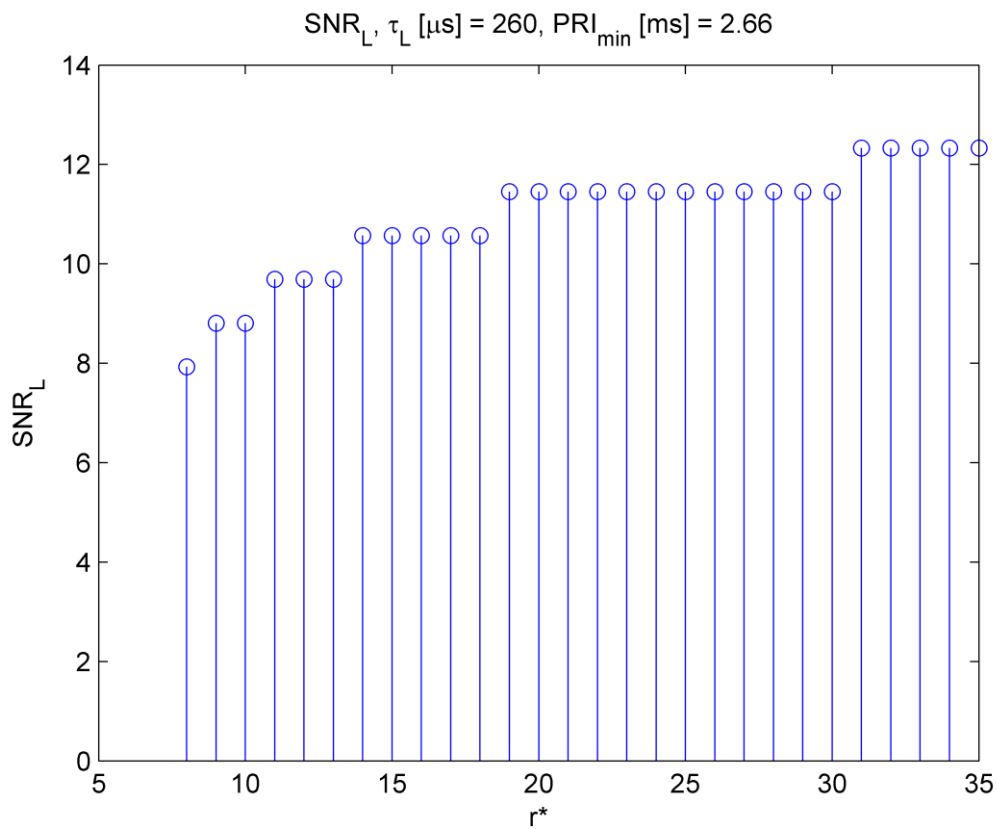
Gornja granica za r^* postavljena je na $r_{UL}^* = 35$. Pod tim uslovom i sa vrednostima parametara iz Tab. 3 utvrđeno je da je ukupan broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja 1126884. Najpre su pronađene sve ove tačke, a zatim su za svaku od njih izračunate vrednosti funkcija cilja.

Zavisnost funkcije cilja SNR_L od promenljivih odlučivanja prikazana je na Sl. 2 i Sl. 3, dok je zavisnost funkcije cilja γ od promenljive odlučivanja r^* prikazana na Sl. 4. Sa pomenutih slika se vidi da su zavisnosti funkcija cilja od promenljivih odlučivanja u skladu sa očekivanjima iz Tab. 2. Poređenjem Sl. 3 i Sl. 4 jasno se vidi konflikt među funkcijama cilja, kao i zaravnjavanje ovih funkcija sa porastom r^* .

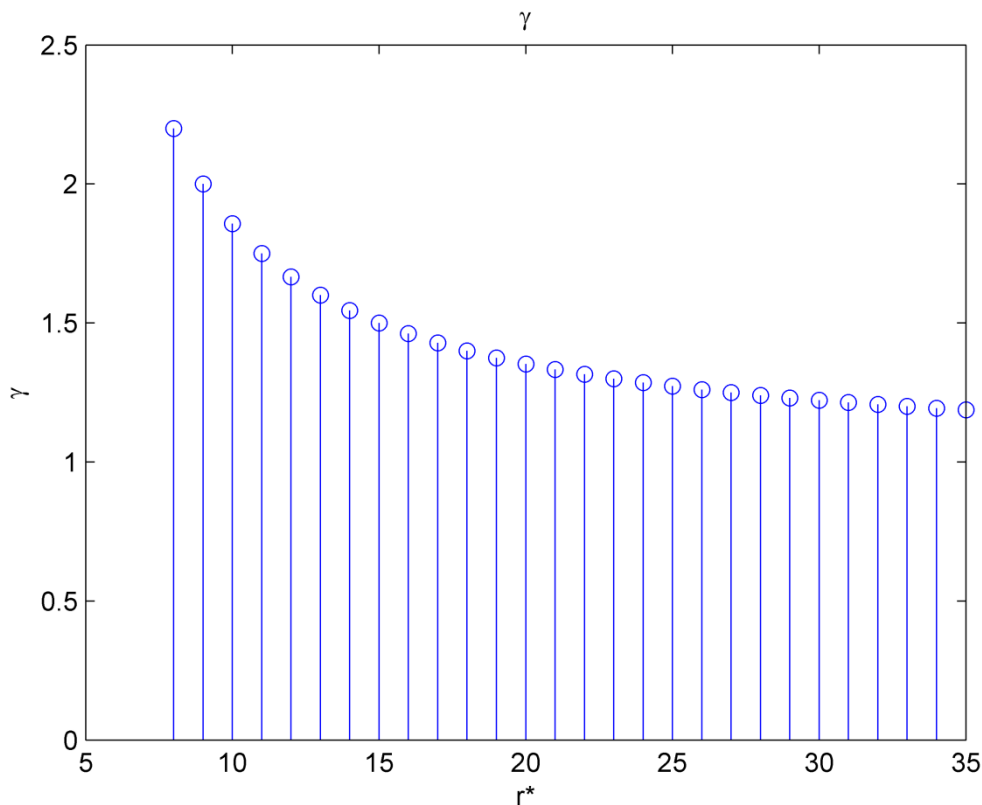
Nakon enumeracije svih tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja, POS i PF su određeni metodom iscrpne pretrage, poređenjem, po vrednostima funkcija cilja, svake tačke u dopustivom prostoru odlučivanja sa svim ostalim tačkama u dopustivom prostoru odlučivanja.



Sl. 2 – Zavisnost SNR_L od τ_L i PRI_{\min} , za fiksnu vrednost r^* .



Sl. 3 – Zavisnost SNR_L od r^* za fiksne vrednosti τ_L i PRI_{\min} .



Sl. 4 – Zavisnost γ od r^* .

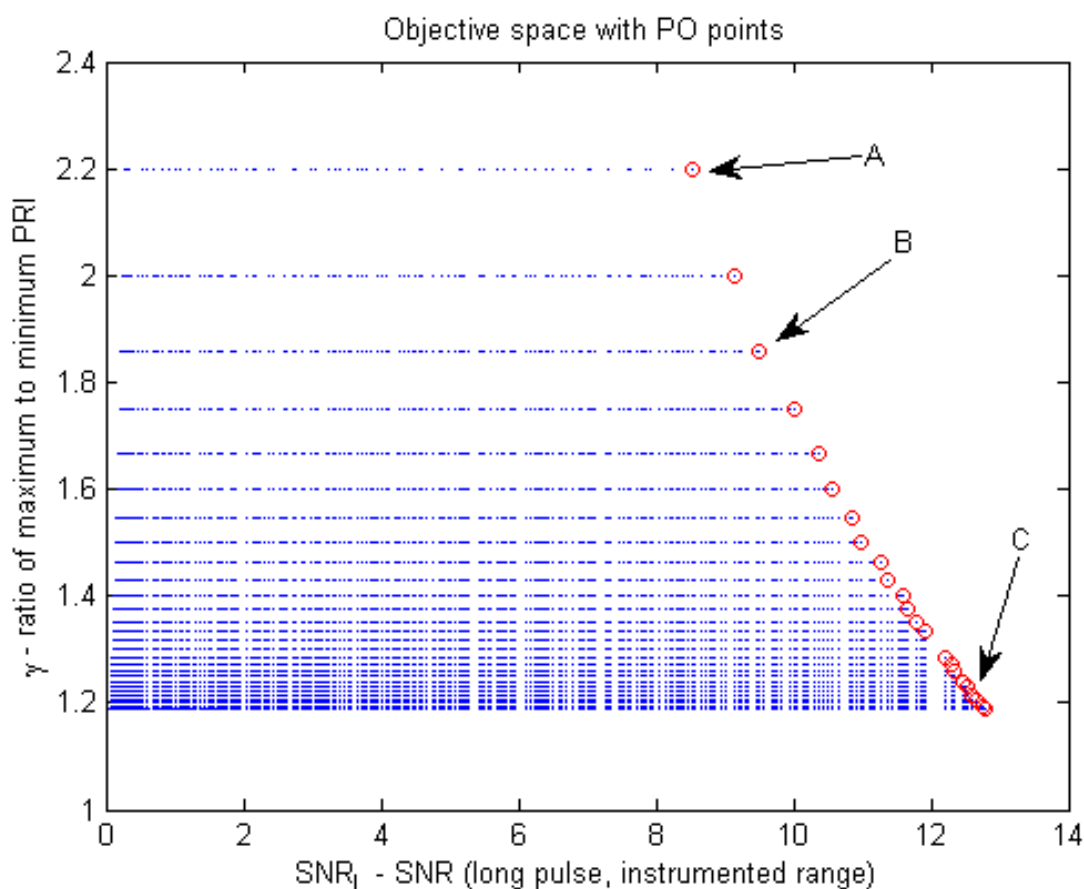
Dopustivi prostor ciljeva i PF prikazani su na Sl. 5, dok su dopustivi prostor odlučivanja i POS prikazani na Sl. 6, Sl. 7, Sl. 8 i Sl. 9. Zbog preglednosti, prikaz dopustivog prostora odlučivanja podjeljen je na četiri slike. Sa Sl. 5 vidi se da sa smanjivanjem γ , usled povećavanja r^* , PO tačke postaju sve bliže jedna drugoj, tj. nove PO tačke koje se dobijaju imaju sve manji i manji značaj. Sa druge strane, sudeći po Sl. 6 do Sl. 9, povećavanjem r^* eksponencijalno raste broj tačaka u delu dopustivog prostora odlučivanja koji se pretražuje. Na osnovu iznetih činjenica, jasno je da je, u kontekstu rešavanja problema, odluka o ograničavanju r^* potpuno opravdana.

U ovakvoj situaciji, kada su mu na raspolaganju PF i POS, donosilac odluke može svoje preferencije da artikuliše a posteriori, što je teoretski najtačniji način izbora konačnog rešenja [9]. Sa Sl. 5 jasno se vidi konflikt među funkcijama cilja, kao i da ceo PF omogućuje među ciljevima trampu, koja je od praktičnog značaja. Tri interesantne tačke PF označene su slovima A, B i C. Istim slovima označene su tačke POS koje se preslikavaju u pomenute tačke PF.

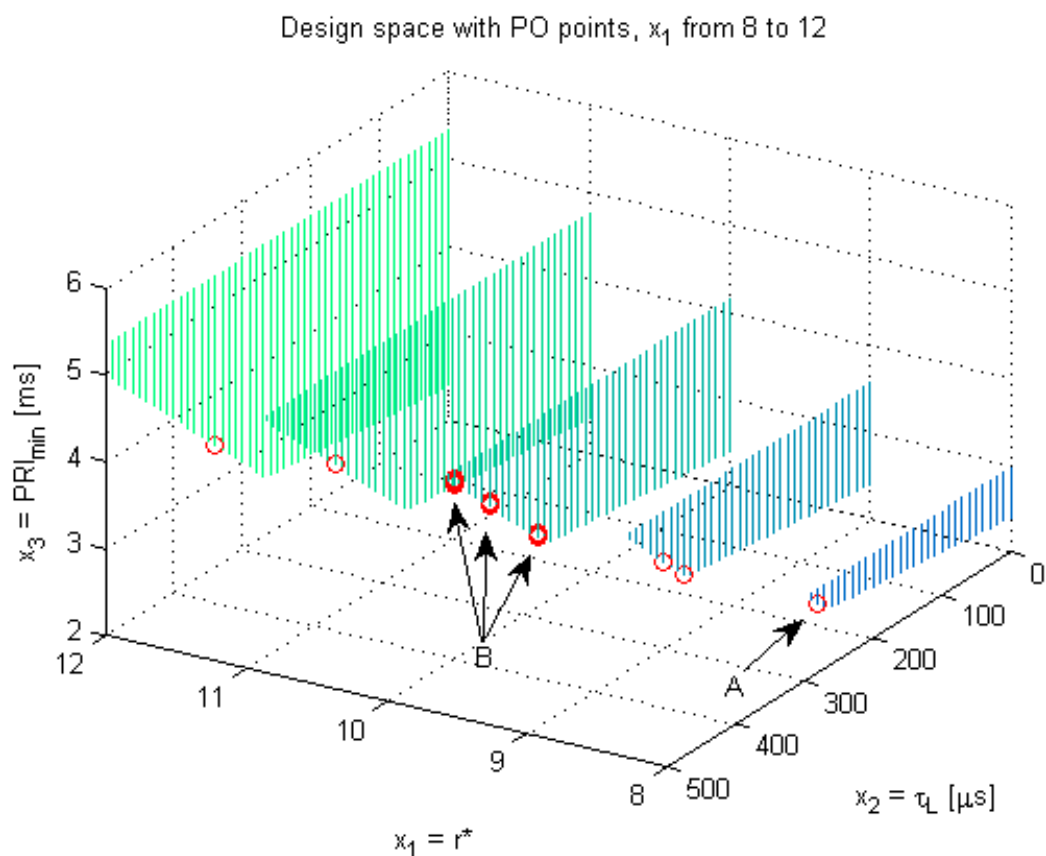
Ako je donosiocu odluke najbitnija Doplerova vidljivost, logičan izbor bi bila tačka A (8.537, 2.2) u PF, jer obezbeđuje najvišu dostižnu vrednost γ , pa samim time i manju šansu za pojavu zona koje su slepe pri svim PRI. Sa druge strane, ako mu je bitnija maksimalna daljina otkrivanja objekata, donosilac odluke bi mogao izabrati tačku na drugom kraju PF, recimo C (12.67, 1.207). Prelaskom iz A u C, SNR_L bi se povećao približno 1.48 puta, odnosno za približno 1.7 dB,

ali bi usled manje vrednosti γ Doplerova vidljivost mogla biti snižena. Konačno, mogla bi se izabrati i neka tačka PF između A i C, kao kompromisno rešenje.

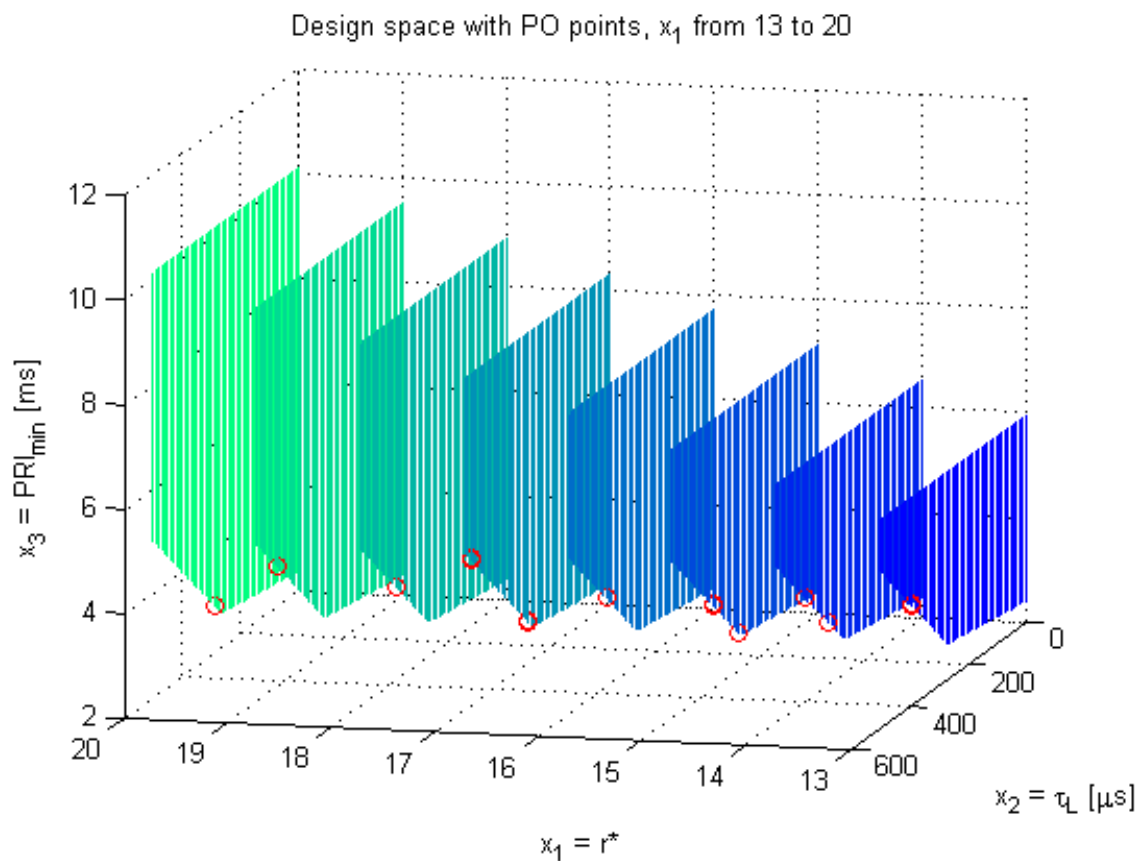
Postoji jedna svojstvenost sistema sa MTD procesorom koja ideju žrtvovanja Doplerove vidljivosti zarad većeg dometa čini prihvatljivom. U MTI i klasičnim impulsnim Dopler procesorima, neće biti otkriven objekat čija se Doplerova frekvencija preslikava u opseg Doplerovih frekvencija klatera, jer će signal iz tog opsega biti odbačen. Nasuprot tome, u MTD sistemu deo signala koji se po Doplerovim frekvencijama poklapa sa klaterom biće prosleđen na obradu pomoću mape klatera. U slučaju da se objekat preklapa sa klaterom spektralno, ali ne i prostorno, postoji mogućnost da bude otkriven. Tako bi na primer, rad u ranije pomenutoj tački C bio od koristi ako je značajno da se otkrije i prati objekat na velikoj daljini, gde nema klatera, a da se pri tome zadrži mogućnost praćenja dela objekata na malima daljinama, gde postoji klater. U praksi bi promena režima rada određenih tačkama A i C mogla da bude dostupna operateru tokom operativnog rada, omogućujući mu prilagođavanje zahtevima aktuelnog zadatka.



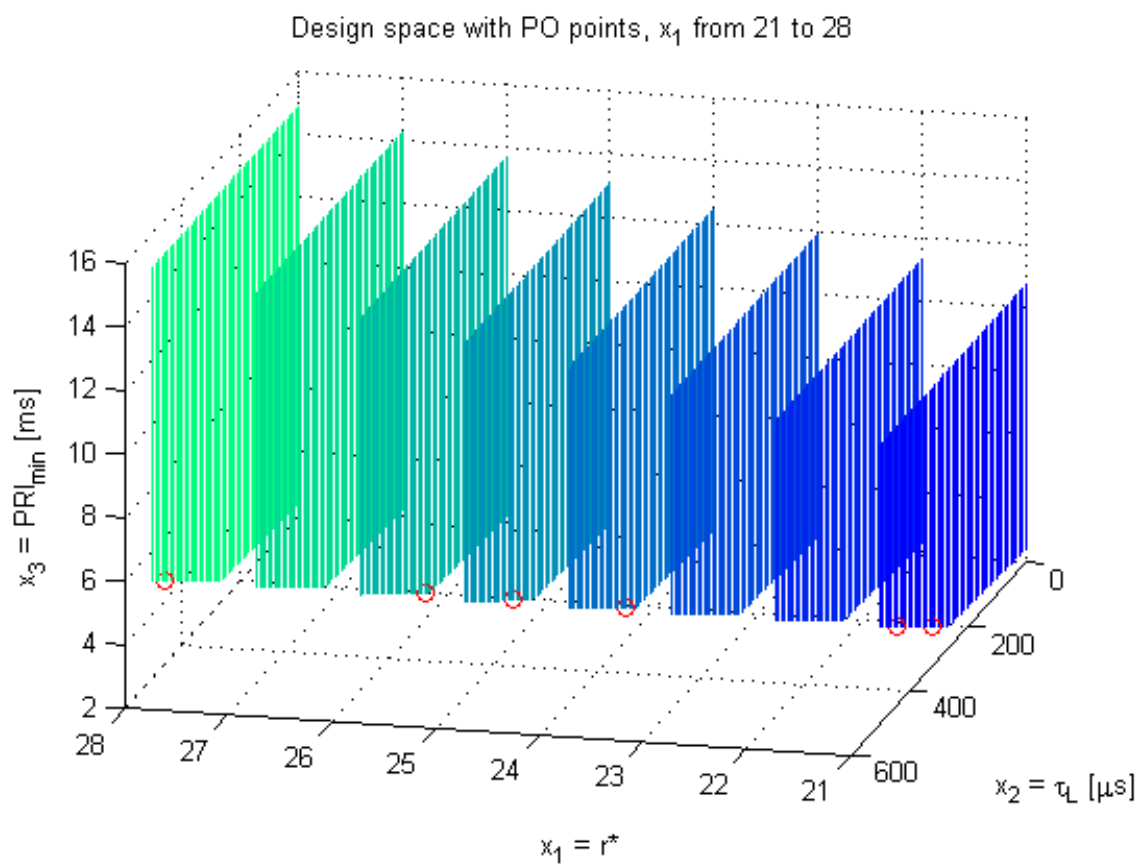
Sl. 5 – Dopustivi prostor ciljeva (plavo) i PF (crveno). Preuzeto iz [38].



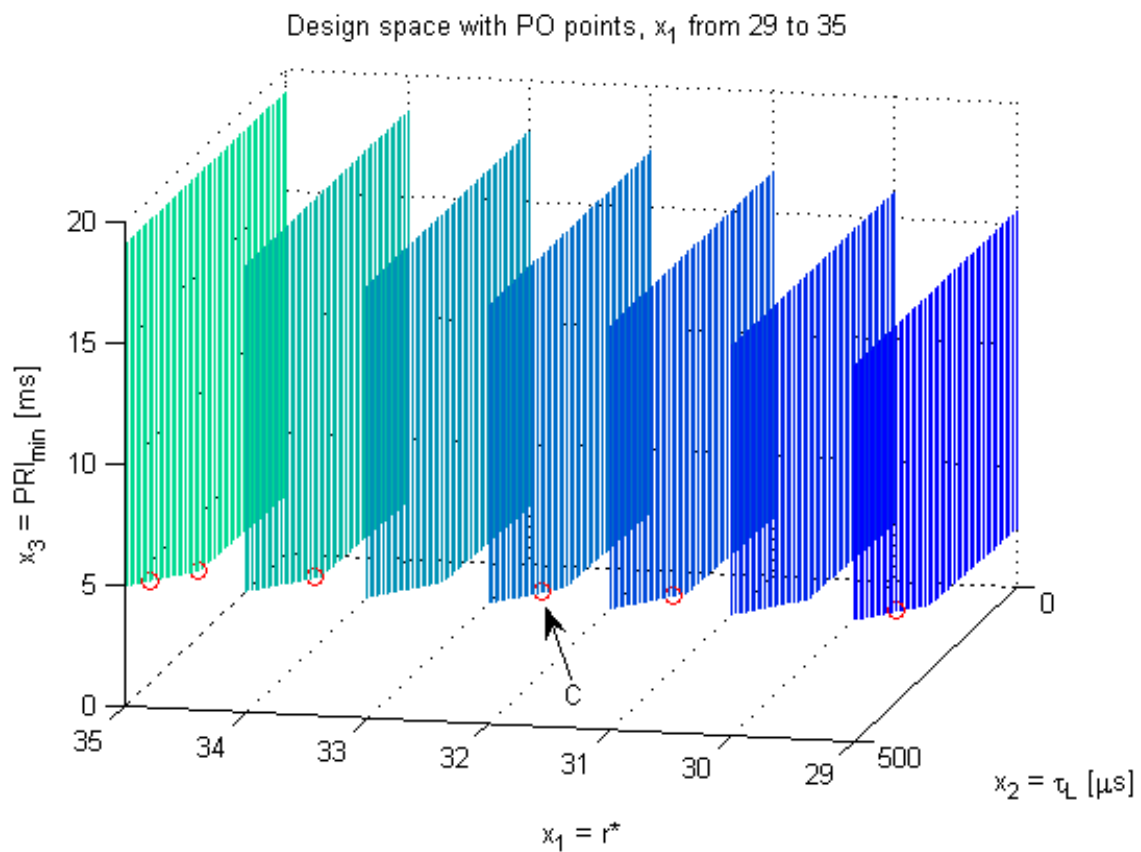
Sl. 6 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno). Preuzeto iz [38].



Sl. 7 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno). Preuzeto iz [38].



Sl. 8 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno). Preuzeto iz [38].



Sl. 9 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno). Preuzeto iz [38].

Interesantno je osvrnuti se na tačku B (9.486, 1.857) u PF. Kao što se može videti sa Sl. 6, više tačaka POS se preslikava u jednu tačku PF. Preciznije, u pitanju je 18 tačaka. Uzrok ovakve pojave je prisustvo operatora zaokruživanja na dole u funkciji cilja SNR_L . Sa stanovišta matematičkog modela M15, potpuno je svejedno koja od 18 tačaka POS će biti izabrana ako se želi rad u tački B PF. Međutim, sa stanovišta praktične implementacije moglo bi biti od interesa da se odabere PO rešenje sa kraćim trajanjem dugog impulsa, redi uštede memorijskog prostora za čuvanje odbiraka unutar-impulsnog talasnog oblika ili zbog ograničenja pojačavača snage.

U Tab. 4 navedene su vrednosti parametara koji definišu MPCIPB (skup PRI/PRF, trajanja impulsa) i još neke bitne karakteristike, za dva moguća režima rada koji odgovaraju tačkama A i C na Sl. 5. Sa stanovišta M15, vrednost trajanja kratkog impulsa se može izabrati proizvoljno iz navedenog intervala, dok će taj izbor u praktičnoj implementaciji zavisiti od kriterijuma i/ili ograničenja koji nisu uvršćeni u matematički model, kao što je na primer rezolucija po daljini, vrsta unutar-impulsne modulacije, itd.

Tab. 4 – Parametri MPCIPB za dva moguća režima rada. Prevedeno iz [38].

Tačka u PF	A (8.537, 2.2)	C (12.67, 1.207)
PRI_n [ms]	{2.8, 5.6, 3.92, 6.16}	{3.4, 3.99, 3.63, 4.1}
PRF_n [Hz]	{357.1, 178.6, 255.1, 162.3}	{294.1, 250.9, 275.1, 243.7}
τ_S [μ s]	[0.52, 10]	[1.37, 10]
τ_L [μ s]	280	340
F_B [Hz]	1786	8529
r_n	{5, 10, 7, 11}	{29, 34, 31, 35}
n_P	9	11

3.2 Matematički model M17

U poređenju sa matematičkim modelom M15, matematički model M17 predstavlja značajno unapređenu verziju matematičkog modela višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB. Objavljen je u [39]. U ovom odeljku najpre će biti predstavljen M17 sa fokusom na razlike u odnosu na M15. Razlike su u pogledu funkcija cilja, tj. unapređenju druge funkcije cilja, koja je merilo Doplerove vidljivosti, te uvođenju treće funkcije cilja, koja je merilo rezolucije po Doplerovoj frekvenciji, tako da su funkcije cilja u M17 potpuno u skladu sa ciljevima definisanim u uvodnom poglavlju.

M17 će biti primenjen na konkretnom primeru koji bi mogao da odgovara hipotetičkom savremenom VHF radaru. Zapravo, biće korišćen isti primer kao i u analizi matematičkog modela

M15 u odeljku 3.1.2. Biće analizirana zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja, a zatim će metodom iscrpne pretrage biti određeni egzaktne POS i PF. Na osnovu egzaktnih POS i PF analiziraće se kako bi donosilac odluke mogao a posteriori da artikuliše svoje preferencije.

3.2.1 Prikaz matematičkog modela M17

U M17 su zadržane iste promenljive odlučivanja kao u M15, a isto važi i za ograničenja. Radi lakšeg praćenja teksta, biće napravljena kratka rekapitulacija. Promenljive odlučivanja su:

- željeno povećanje prve prave slepe Doplerove frekvencije, r^* ,
- trajanje dugog impulsa, τ_L ,
- najkraći PRI u skupu PRI, PRI_{min} .

Formalne definicije promenljivih odlučivanja x_1 , x_2 i x_3 , kao i vektora promenljivih odlučivanja \mathbf{x} za M17 navedene su u (38). Promenljiva r^* je prirodan broj, a promenljive τ_L i PRI_{min} su pozitivni realni brojevi diskretizovani koracima τ_{STEP} i PRI_{STEP} , repektivno.

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv r^*, & x_2 &\equiv \tau_L, & x_3 &\equiv PRI_{min} \\ \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \end{aligned} \quad (38)$$

Dopustivi prostor odlučivanja \mathbf{X} za M17, određen sa 5 ograničenja tipa nejednakosti, formalno je definisan u (39).

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, 5\} \\ g_1(\mathbf{x}) &= r^* - \Delta f_{ua} \cdot \frac{2R_I}{c} + \Delta r_{min} \\ g_2(\mathbf{x}) &= \sqrt[5]{\frac{1}{Q_{SNR}} \cdot \frac{2R_{min}}{c} \cdot \left(\frac{2R_I}{c}\right)^4} - \tau_L \\ g_3(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{2R_I}{c} - \tau_L \\ g_4(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{1}{D} \cdot \tau_L \\ g_5(\mathbf{x}) &= \frac{r^* + \Delta r_{min}}{\Delta f_{ua}} - PRI_{min} \end{aligned} \quad (39)$$

Prva funkcija cilja u M17 je ista kao i u M15, odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na instrumentalnoj daljini „osvetli“ dugim impulsom SNR_L .

U pogledu druge funkcije cilja, koja se odnosi na Doplerovu vidljivost, U M17 je odbačen indirektni pokazatelj γ koji je korišćen u M15. Umesto toga, za drugu funkciju cilja usvojen je direktan pokazatelj Doplerove vidljivosti, nazvan procenat Doplerove vidljivosti (eng. Doppler

visibility percentage (DVP)) i označen sa *DVP*. Pre definisanja *DVP*, pogodno je rekapitulirati određene definicije i uvesti nekoliko novih.

Kao što je već rečeno u uvodnom poglavlju, slepa zona je opseg frekvencija koji je cenzurisani radi potiskivanja klatera. Objekat od interesa koji ima Doplerovu frekvenciju unutar ovakvog opsega biće potisnut, pa je radar efektivno „slep“, tj. „ne vidi“ takav objekat. Slepe zone su centrirane na celobrojnim umnošcima PRF, a širina im je jednaka širini cenzuriranih Dopler filtara. U ovom tekstu termin slepa zona se koristi u kontekstu rada sa određenom PRF, tako da svaka PRF ima drugačije raspoređene slepe zone.

Osnovna slepa zona je slepa zona centrirana na nultoj Doplerovoj frekvenciji.

U kontekstu ovog teksta, višestruka slepa zona je opseg frekvencija u kojem postoji preklapanje slepih zona dve ili više PRF. U višestrukoj slepoj zoni otkrivanje objekata je ili otežano ili potpuno nemoguće.

Procenat Doplerove vidljivosti, odnosno *DVP*, je ovde definisan kao procenat opsega Doplerovih frekvencija od interesa koji nije prekriven višestrukim slepim zonama. Treba imati u vidu da *DVP* nikada neće biti 100%, jer je preklapanje slepih zona svih PRF oko nulte frekvencije neizbežno. Sa druge strane, pogodnim izborom skupa PRF moguće je izbeći, ili barem minimizirati prisutnost višestrukih slepih zona na drugim frekvencijama.

Ključni korak za izračunavanje *DVP* je određivanje širine osnovne slepe zone Δv_b . Ova širina ne mora biti ista za sve PRF, pa će po potrebi biti korišćena oznaka $\Delta v_b(n)$. Da bi se odredila širina osnovne slepe zone potrebno je modelovati spektralne karakteristike klatera i proces cenzurisanja Dopler filtara.

Za detaljne informacije o modelovanju spektralnih karakteristika klatera, čitalac se upućuje na str. 2.11 do 2.16 u [3]. U idealnom slučaju spektralni odziv stacionarnog klatera trebalo bi da bude Dirakov impuls. U praksi međutim, spektralni odziv klatera je proširen usled [3]:

- unutrašnjeg kretanja u okviru klatera, tj. pomeranja krošnji drveća zbog vetra,
- amplitudske modulacije zbog kretanja antene prilikom skeniranja.

Za potrebe modelovanja spektralnih karakteristika klatera usvojen je Gausovski model, opisan u [3]. Po Gausovskom modelu, spektralna gustina snage klatera ima oblik Gausove krive. Za oba uzroka širenja spektra klatera usvojeno je da je Gausova kriva centrirana na nultoj frekvenciji.

Standardna devijacija spektra klatera usled vetra σ_{f_w} je parametar matematičkog modela koji se određuje u zavisnosti od jačine vetra, na osnovu izmerenih podataka sumiranih u tab. 2.1 u [3].

Formula za standardnu devijaciju spektra klatera usled skeniranja antene za slučaj rada sa samo jednom PRF navedena je u jed. (2.15) u [3]. Za slučaj sa više PRF, jednačina je prilagođena zamenom PRI srednjim PRI PRI_{avg} i izračunavanjem broja iluminacija objekta dok boravi u snopu antene kao $N \cdot n_p$, čime se došlo do izraza (40) za standardnu devijaciju spektra klatera usled skeniranja antene σ_{fs} .

$$\sigma_{fs} = \frac{0.265}{PRI_{avg} \cdot N \cdot n_p} \quad (40)$$

Da bi se modelovali kombinovani efekti širenja spektra klatera usled vetra i skeniranja antene, potrebno je odrediti konvoluciju pojedinačnih spektara [3]. Pošto oba spektra imaju oblik Gausove krive, njihovom konvolucijom će se takođe dobiti Gausova kriva [3], a standardna devijacija spektra klatera σ_f biće određena izrazom (41) [3].

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{fw}^2 + \sigma_{fs}^2} \quad (41)$$

Pretpostavljeno je da je banka Dopler filtera implementirana pomoću DFT. Efekti odbacivanja spektralnih odbiraka, odnosno cenzurisanja Dopler filtera, modelovani su idealnim visokopropusnim filtrom čija granična učestanost f_c je određena brojem cenzurisanih filtera n_c kao u izrazu (42), gde je N_{DFT} dužina DFT, odnosno ukupan broj Dopler filtera.

$$f_c(n, n_c) = (2n_c - 1) \frac{PRF_n}{2N_{DFT}}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad n_c = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N_{DFT}}{2} \right\rfloor \quad (42)$$

Slabljenje klatera (eng. clutter attenuation (CA)) definisano je izrazom (43), po uzoru na jed. 17.20 iz [4], sa tom razlikom da se integracija vrši od 0 do $PRF_n/2$, imajući u vidu da je spektar klatera simetričan.

$$CA(n, f_c) = 10 \log \frac{\int_0^{\frac{PRF_n}{2}} \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_f^2} f^2} df}{\int_{f_c}^{\frac{PRF_n}{2}} \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_f^2} f^2} df}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (43)$$

Širina osnovne slepe zone Δv_b određena je izrazom (44), gde je f_c^* najniža granična učestanost koja obezbeđuje minimalno prihvatljivo slabljenje klatera CA_{min} , a definisana je izrazom (45).

$$\Delta v_b(n) = 2f_c^*(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (44)$$

$$f_c^*(n) = \min_{n_c} f_c(n, n_c), \quad s. t. \quad CA(n, f_c) \geq CA_{min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (45)$$

Na osnovu širine osnovne slepe zone $\Delta v_b(n)$, za svaku PRF može se odrediti raspored slepih zona, koji se može opisati funkcijom $BZD(n, f)$ (46), čija je vrednost 1 u slepim zonama, a 0 van slepih zona. Na osnovu $BZD(n, f)$ može se odrediti raspored broja preklopljenih slepih zona, opisan funkcijom $OBZCD(f)$ (47), čija je vrednost jednaka ukupnom broju PRF čije slepe zone se preklapaju na datoj frekvenciji. Na osnovu $OBZCD(f)$ može se odrediti raspored višestrukih slepih zona, opisan funkcijom $MBZD(f)$ (48), čija je vrednost 1 u višestrukim slepim zonama, a 0 van višestrukih slepih zona. Konačni izraz za DVP je (49), gde je $f_{max} = 2v_{max}/\lambda$ apsolutna vrednost maksimalne Doplerove frekvencije od interesa.

$$BZD(n, f) = \begin{cases} 1; f \in \left[\frac{k}{PRI_n} - \frac{\Delta v_b(n)}{2}, \frac{k}{PRI_n} + \frac{\Delta v_b(n)}{2} \right], k \in \mathbb{Z} \\ 0; f \notin \left[\frac{k}{PRI_n} - \frac{\Delta v_b(n)}{2}, \frac{k}{PRI_n} + \frac{\Delta v_b(n)}{2} \right], k \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (46)$$

$$OBZCD(f) = \sum_{n=1}^N BZD(n, f) \quad (47)$$

$$MBZD(f) = \begin{cases} 1; OBZCD(f) > 1 \\ 0; OBZCD(f) \leq 1 \end{cases} \quad (48)$$

$$DVP = \frac{\int_0^{f_{max}} [1 - MBZD(f)] df}{f_{max}} \cdot 100\% \quad (49)$$

Treća funkcija cilja odnosi se na rezoluciju po radijalnoj brzini i odgovara trećem cilju optimizacije koji je identifikovan u uvodnom poglavlju. Uobičajeno je da se za rezoluciju po Doplerovoj frekvenciji (Doplerovu rezoluciju) uzima Rejljeva širina glavnog loba DFT (videti str. 509 u [4]), koja je inverzno proporcionalna vremenu posmatranja. Množenjem Doplerove rezolucije polovinom talasne dužine, dobija se rezolucija po radijalnoj brzini. Sposobnost razlučivanja ciljeva na osnovu njihovih brzina poboljšava se kada se rezolucija smanjuje. Kao što je u uvodnom delu poglavlja 3 rečeno, usvojeno je da n_p ima istu vrednost u svim CPI, usled čega rezolucija po radijalnoj brzini nije ista u svakom CPI. Najveća, tj. najlošija rezolucija će biti u CPI sa najkraćim PRI PRI_{min} , dok će rezolucije u ostalim CPI biti bolje. Kao treća funkcija cilja usvojena je negirana najveća rezolucija po radijalnoj brzini $-VR_{max}$ definisana izrazom (50). Negacija je neophodna da bi se povećavanjem vrednosti funkcije cilja ostvarilo poboljšanje, tj. smanjenje rezolucije. Kombinovanjem (31) i (50) dobija se konačan izraz za $-VR_{max}$ (51).

$$-VR_{max} = -\frac{1}{PRI_{min} \cdot n_p} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (50)$$

$$-VR_{\max} = -\frac{1}{PRI_{\min} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{\min}}{r^* + \Delta r_{\text{avg}}} \cdot \frac{1}{PRI_{\min} \cdot N} \right]} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (51)$$

Formalne definicije funkcija cilja $F_1(\mathbf{x})$, $F_2(\mathbf{x})$ i $F_3(\mathbf{x})$, kao i vektora funkcija cilja $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ za M17 navedene su u (52).

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{x}) &\equiv SNR_L = C_{SNR} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{\min}}{r^* + \Delta r_{\text{avg}}} \cdot \frac{1}{PRI_{\min} \cdot N} \right] \cdot \tau_L \\ F_2(\mathbf{x}) &\equiv DVP = \frac{\int_0^{f_{\max}} [1 - MBZD(f)] df}{f_{\max}} \cdot 100\% \\ F_3(\mathbf{x}) &\equiv -VR_{\max} = -\frac{1}{PRI_{\min} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{\min}}{r^* + \Delta r_{\text{avg}}} \cdot \frac{1}{PRI_{\min} \cdot N} \right]} \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [F_1(\mathbf{x}) \quad F_2(\mathbf{x}) \quad F_3(\mathbf{x})]^T \end{aligned} \quad (52)$$

Dopustivi prostor ciljeva \mathbf{Z} za M17 definisan je u (53), istovetno kao u M15.

$$\mathbf{Z} = \{\mathbf{F}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\} \quad (53)$$

Ovim je potpuno definisan matematički model M17 višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB. Sam višeciljni optimizacioni problem definisan je u (54), istovetno kao u M15.

$$\mathbf{x}^* = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} \mathbf{F}(\mathbf{x}) \text{ s. t. } g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (54)$$

3.2.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M17, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija

Analizom formula za SNR_L i $-VR_{\max}$ u (52) može se načelno predvideti kako će promenljive odlučivanja uticati na ove funkcije cilja. Za funkciju cilja DVP analiza nije tako jednostavna jer funkcija nije zadata eksplicitno, već podrazumeva niz koraka koji uključuju integraljenje i pretraživanje. Ipak, i za DVP se mogu barem grubo pretpostaviti trendovi promene u zavisnosti od promenljivih odlučivanja. Sa porastom r^* , očekuje se da će PRF načelno biti bliže jedna drugoj, što bi moglo intenzivirati poklapanja slepih zona pri različitim PRF, pa time i smanjenje DVP . Sa druge strane, porast PRI_{\min} znači smanjivanje svih PRF, dok prema (16), (31) i (40) nije lako predvideti da li će širina spektra klatera usled skeniranja antene pokazivati trend rasta ili pada, sa porastom PRI_{\min} . Pošto je sa porastom PRI_{\min} izvesno smanjivanje svih PRF, a nije jasno da li će širina spektra klatera usled skeniranja antene pokazivati ikakve trendove, i kakvi bi eventualni trendovi bili, ipak je pretpostavljeno da će smanjivanje svih PRF imati dominantan uticaj, tj. da će DVP imati trend opadanja sa porastom PRI_{\min} . No, ne može se tvrditi da u okviru pomenutih anticipiranih trendova neće postojati lokalni ekstremumi. U Tab. 5 sumirano je kako očekujemo da

će se menjati vrednosti funkcija cilja kada se povećavaju vrednosti promenljivih odlučivanja. Očekivani su konflikti među funkcijama cilja kada se menja vrednost promenljive r^* , a potencijal za konflikt postoji i u pogledu menjanja vrednosti PRI_{\min} . U skladu sa time, može se pretpostaviti da optimalno rešenje \mathbf{x}^* problema definisanog u (54) neće biti jedinstveno, već će postojati više PO rešenja.

Tab. 5 – Očekivana zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja. *Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer, Operations Research Proceedings 2015 by K.F. Doerner et al. (eds.), © Springer International Publishing Switzerland 2017 [39].*

	$x_1 \equiv r^* \uparrow$	$x_2 \equiv \tau_L \uparrow$	$x_3 \equiv PRI_{\min} \uparrow$
$F_1(\mathbf{x}) \equiv SNR_L$	↑ (stepenice)	↑	↓ (stepenice)
$F_2(\mathbf{x}) \equiv DVP$	↓ (trend)	(nema uticaja)	↓ (trend)
$F_3(\mathbf{x}) \equiv -VR_{\max}$	↑ (stepenice)	(nema uticaja)	↓ (testera)

Analiza karakteristika matematičkog modela M15 u odeljku 3.1.2 je pokazala da je, u kontekstu rešavanja problema, opravdano ograničiti promenljivu r^* sa gornje strane i time postići da dopustivi prostor odlučivanja sadrži konačan broj tačaka. Isti princip usvojen je i za M17, tj, za potrebe praktične primene matematičkog modela M17 mora da važi $r^* \leq r_{UL}^*$.

Radi detaljnije analize karakteristika M17, primenjena je numerička simulacija, na konkretnom primeru hipotetičkog savremenog VHF radara. Usvojeni parametri M17 navedeni su u Tab. 6 i imaju iste vrednosti kao i u slučaju M15 (videti Tab. 3), sa tom razlikom da M17 ima tri dodatna parametra modela.

Gornja granica za r^* postavljena je na $r_{UL}^* = 35$, isto kao u analizi M15. Pod tim uslovom i sa vrednostima parametara iz Tab. 6 utvrđeno je da je ukupan broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja 1126884, isto kao i za M15, što je i očekivano jer su promenljive odlučivanja i ograničenja isti u M15 i M17, a i zajednički parametri modela imaju iste vrednosti. Nakon pronalazanja svih tačaka dopustivog prostora odlučivanja, za svaku od njih izračunate su vrednosti funkcija cilja.

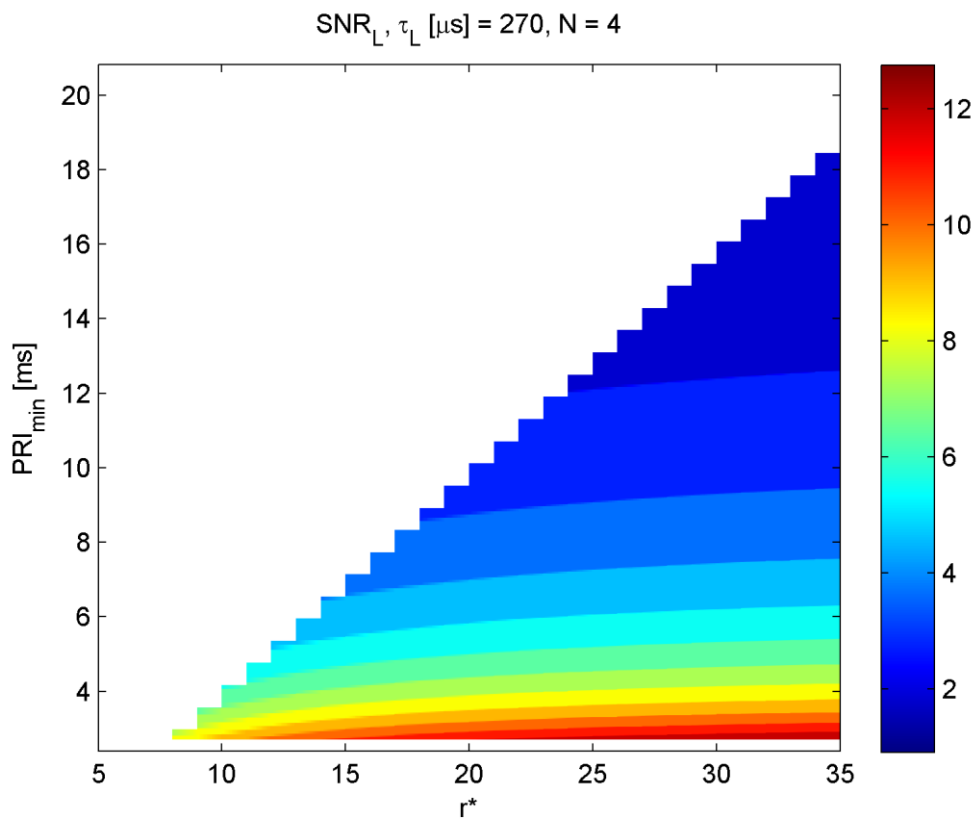
Zavisnost funkcije cilja SNR_L od promenljivih odlučivanja r^* i PRI_{\min} , za fiksnu vrednost promenljive τ_L , prikazana je na Sl. 10. Pošto matematički modeli M15 i M17 imaju iste promenljive odlučivanja, ista ograničenja i istovetno definisanu funkciju cilja SNR_L , Sl. 2 i Sl. 3 važe i za M17. Na Sl. 2 se jasno vidi linearna zavisnost SNR_L od τ_L . Zavisnost funkcija cilja DVP i $-VR_{\max}$ od promenljivih odlučivanja r^* i PRI_{\min} , prikazana je na Sl. 11 i Sl. 12, respektivno. Zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja delimično jeste u skladu sa očekivanjima iz Tab. 5, ali postoje značajna odstupanja po pitanju funkcije cilja DVP .

Tab. 6 – Parametri matematičkog modela M17 koji odgovaraju hipotetičkom savremenom VHF radaru

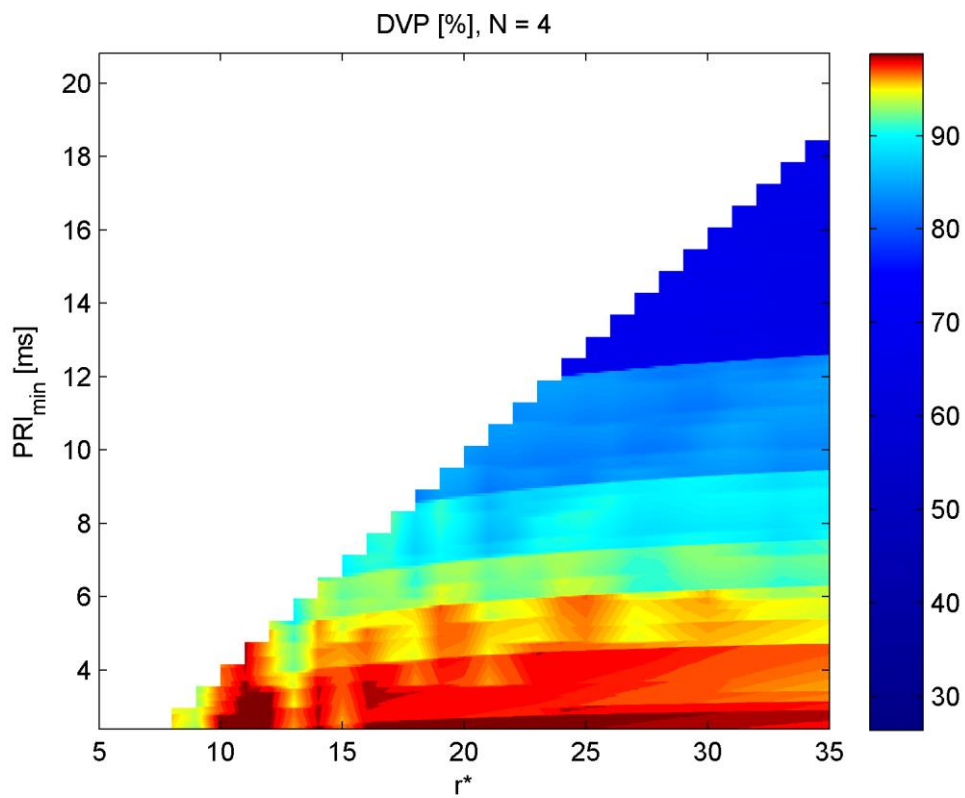
<i>Parametar</i>	<i>Vrednost</i>
P_t	8 kW
G	426
λ	1.6667 m
T_0	290 K
θ_3	6 °
ω	36 °/s
F	1.6965
L_S	26.3027
σ	5 m ²
R_{min}	1.5 km
R_I	360 km
v_{max}	700 m/s
D	0.1
Q_{SNR}	10
N	4
τ_{STEP}	10 μs
PRI_{STEP}	10 μs
σ_{fw}	0.3 Hz
N_{DFT}	64
CA_{min}	40 dB

Dok se u zavisnosti DVP od PRI_{min} u suštini može uočiti opadajući trend, sa značajnim lokalnim anomalijama, u zavisnost DVP od r^* teško može da se uoči bilo kakav trend, mada definitivno postoje oblasti gde DVP opada sa r^* . Poređenjem Sl. 10 i Sl. 11 deluje da je najznačajniji konflikt među funkcijama cilja u donjem desnom delu ravni određenoj promenljivama r^* i PRI_{min} , gde sa porastom r^* , SNR_L raste, a DVP opada.

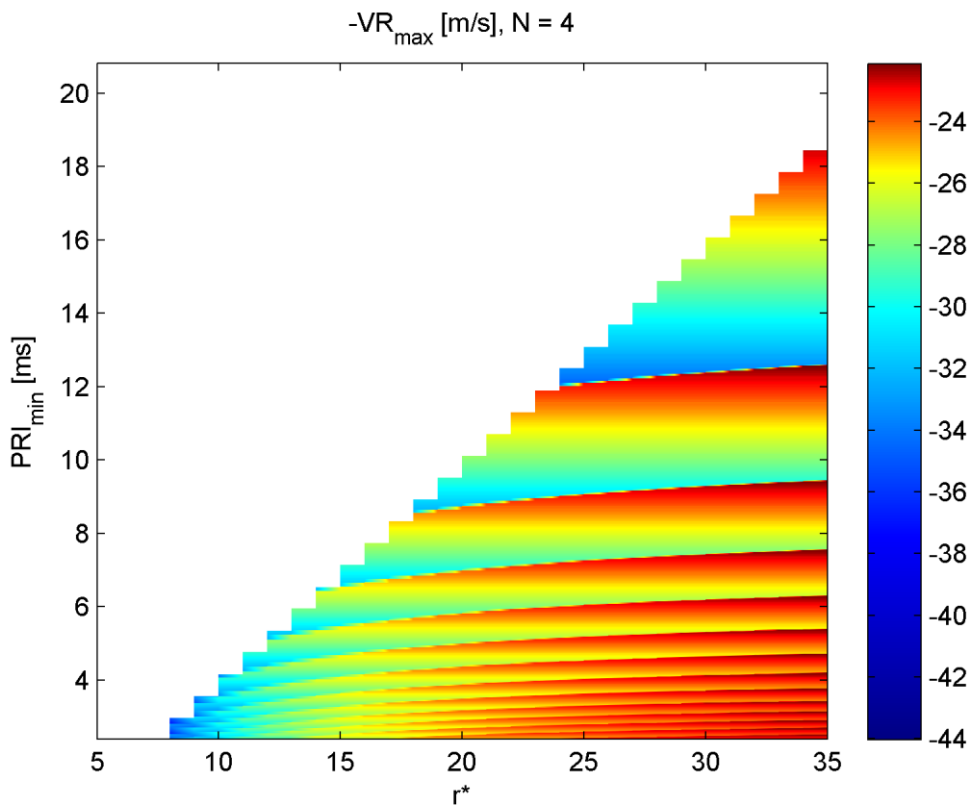
Nakon enumeracije svih tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja, POS i PF su određeni metodom iscrpne pretrage, poređenjem, po vrednostima funkcija cilja, svake tačke u dopustivom prostoru odlučivanja sa svim ostalim tačkama u dopustivom prostoru odlučivanja.



Sl. 10 – Zavisnost SNR_L od r^* i PRI_{min} , za fiksnu vrednost τ_L .



Sl. 11 – Zavisnost DVP od r^* i PRI_{min} .



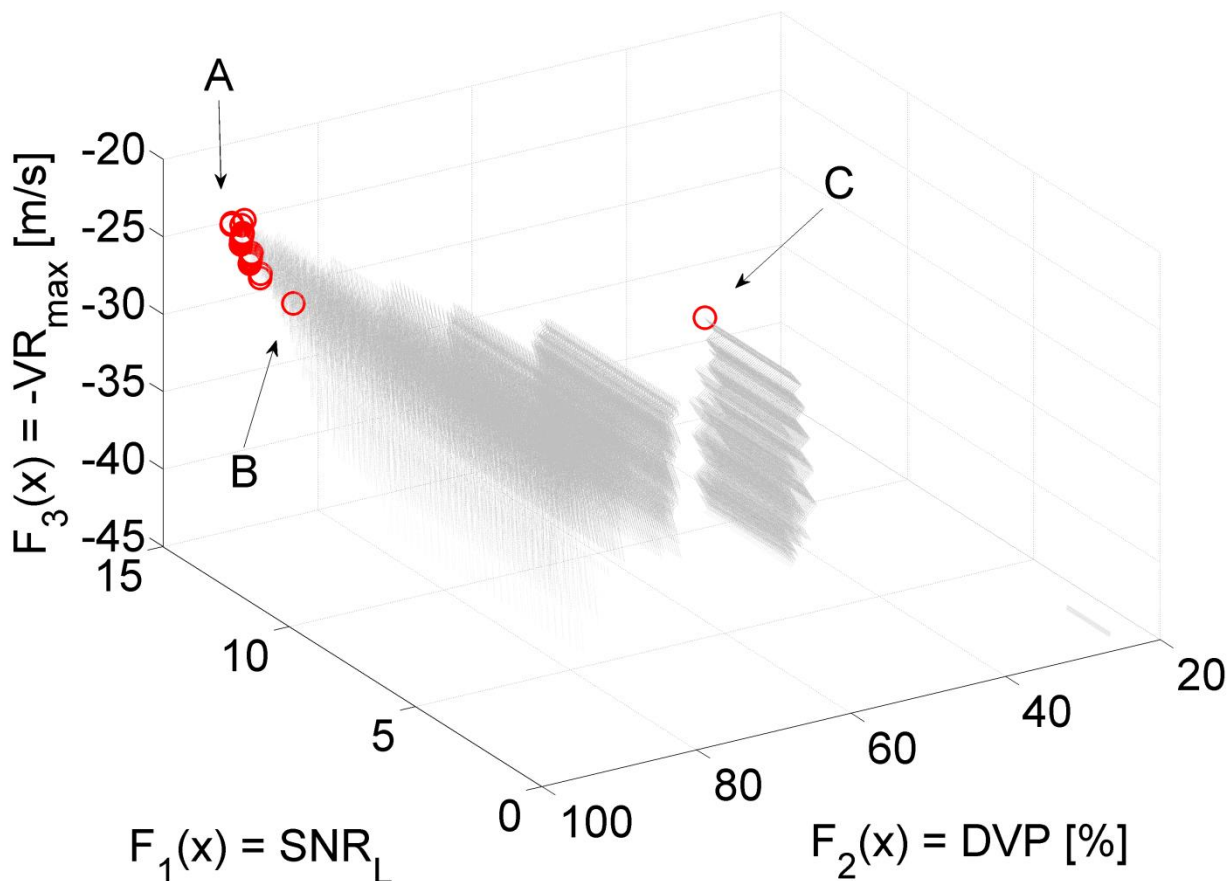
Sl. 12 – Zavisnost $-VR_{max}$ od r^* i PRI_{min} .

Dopustivi prostor ciljeva i PF prikazani su na Sl. 13, dok su dopustivi prostor odlučivanja i POS zbog preglednosti prikazani deo po deo na četiri slike Sl. 14, Sl. 15, Sl. 16 i Sl. 17.

Tri tačke PF posebno su interesantne i označene su slovima A, B i C na Sl. 13. Istim slovima na Sl. 15 i Sl. 17 označene su tačke POS koje se preslikavaju u pomenute tačke PF. Tačke A (12.81, 98.26, -22.05), B (10.13, 99.06, -24.37) i C (3.388, 67.83, -22.03) su tačke PF koje odgovaraju maksimalnim vrednostima funkcija cilja SNR_L , DVP i $-VR_{max}$, respektivno. Posmatranjem PF može se uočiti da isti ima dva kraka:

- Krak A-B, koji se sastoji od tačaka A, B i svih tačaka PF između njih,
- Krak A-C, koji se sastoji od tačke C i dve tačke PF neposredno desno od tačke A.

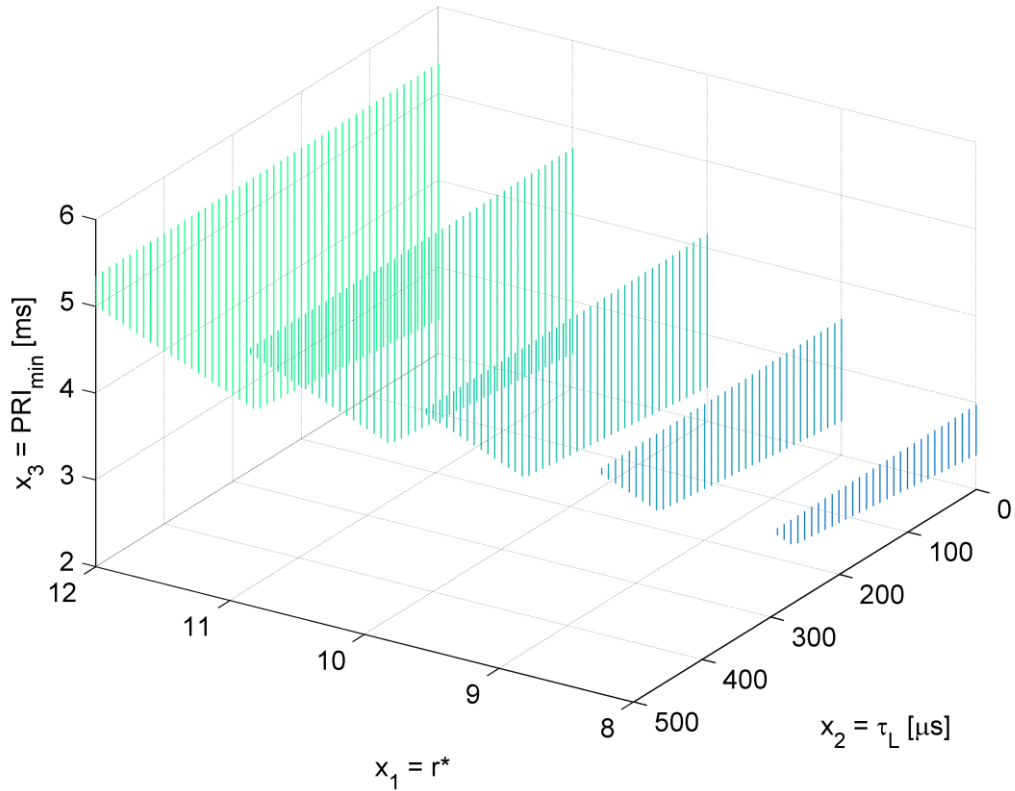
U poređenju sa tačkom A, krak A-C nudi zanemarljivo povećanje $-VR_{max}$ na račun ogromnog smanjenja SNR_L i/ili DVP , pa stoga krak A-C nije relevantan sa praktične tačke gledišta. Sa druge strane, prelaskom iz B u A, može se postići trampa koja ima praktičan značaj. Naime, SNR_L se povećava 1.26 puta (relativno poboljšanje 26%), a $-VR_{max}$ za 2.32 m/s (relativno poboljšanje od 9.5%), na račun apsolutnog smanjenja DVP za 0.8%, što krak A-B čini relevantnim u praksi.



Sl. 13 – Dopustivi prostor ciljeva (sivo) i PF (crveno). Tačke A (12.81, 98.26, -22.05), B (10.13, 99.06, -24.37) i C (3.388, 67.83, -22.03) su tačke PF koje odgovaraju maksimalnim vrednostima funkcija cilja SNR_L , DVP i $-VR_{max}$, respektivno. [Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer, Operations Research Proceedings 2015 by K.F. Doerner et al. \(eds.\), © Springer International Publishing Switzerland 2017 \[39\].](#)

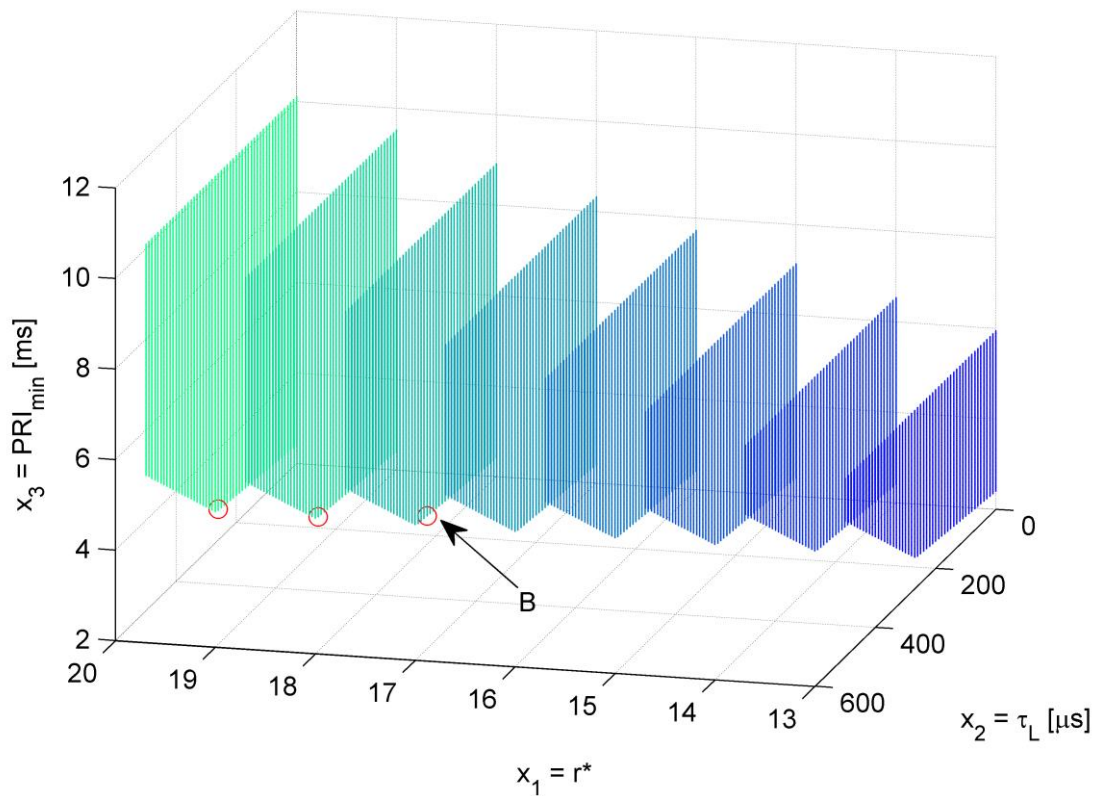
Za razliku od M15 gde je ceo PF omogućavao za praksu značajnu trampu među ciljevima, PF M17 ima takvu osobinu samo u jednom svom delu, kraku A-B. Zato bi donosilac odluke prilikom a posteriori artikulacije preferencija trebalo da razmatra samo krak A-B. Ako je donosiocu odluke Doplerova vidljivost od ultimativnog značaja, logično bi bilo da izabere tačku B. Ako mu je pak od ultimativnog značaja maksimalna daljina otkrivanja objekata, mogao bi izabrati tačku A, uz svest da se žrtvuje deo Doplerove vidljivosti. Naravno, i ostale tačke kraka A-B bi mogle biti izabrane, u slučaju da donosilac odluke nema ultimativnu preferenciju prema jednom od pomenutih ciljeva. U praksi bi promena režima rada određenih tačkama kraka A-B mogla da bude dostupna operateru tokom operativnog rada, omogućujući mu prilagođavanje zahtevima aktuelnog zadatka, slično kao u slučaju M15.

Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 8 do 12



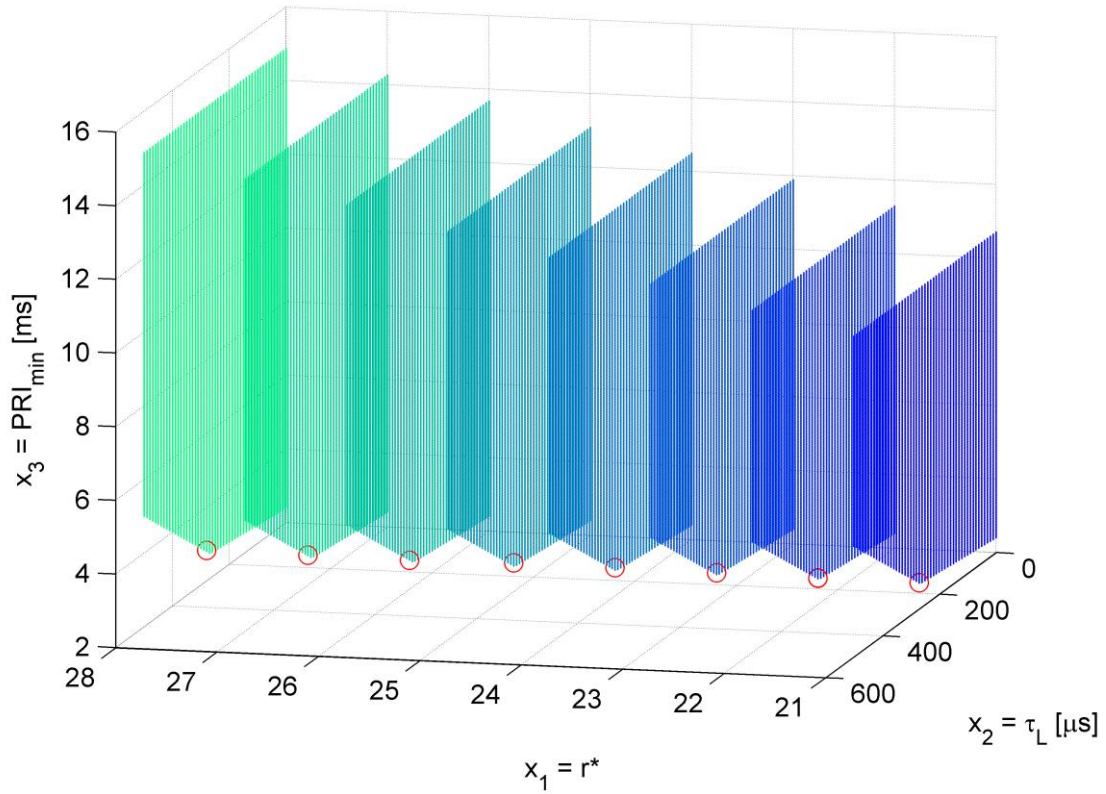
Sl. 14 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 13 do 20



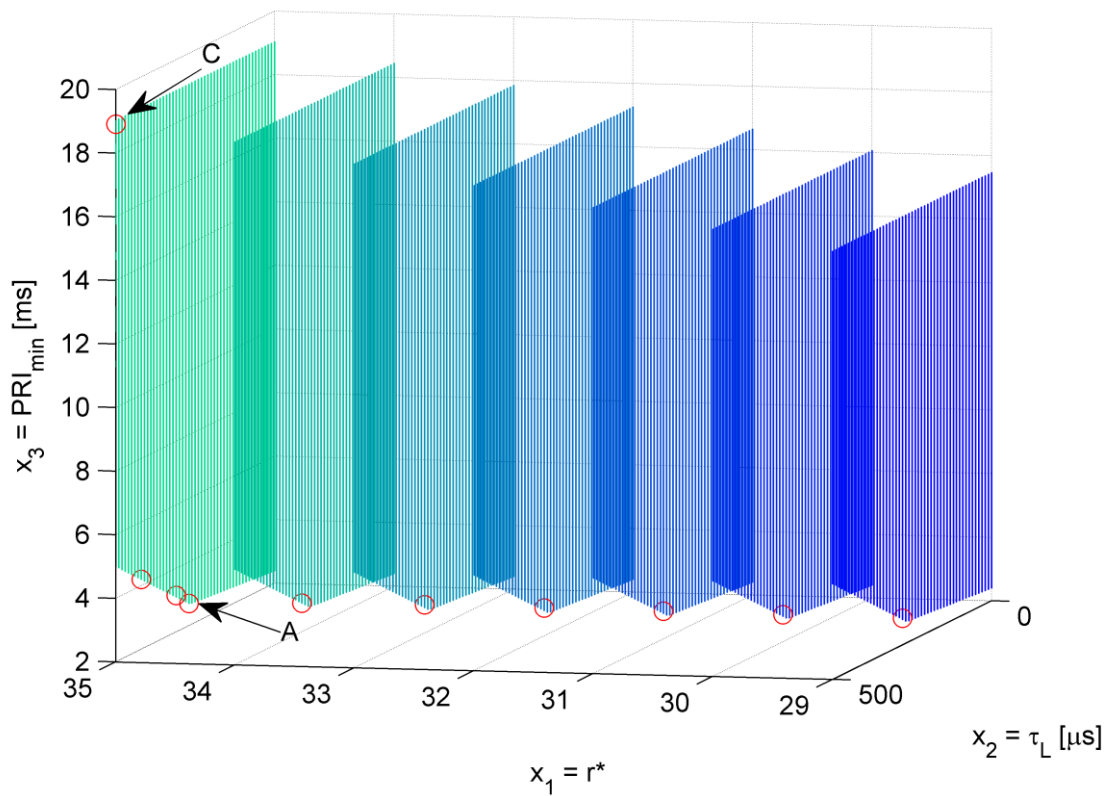
Sl. 15 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 21 do 28



Sl. 16 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 29 do 35

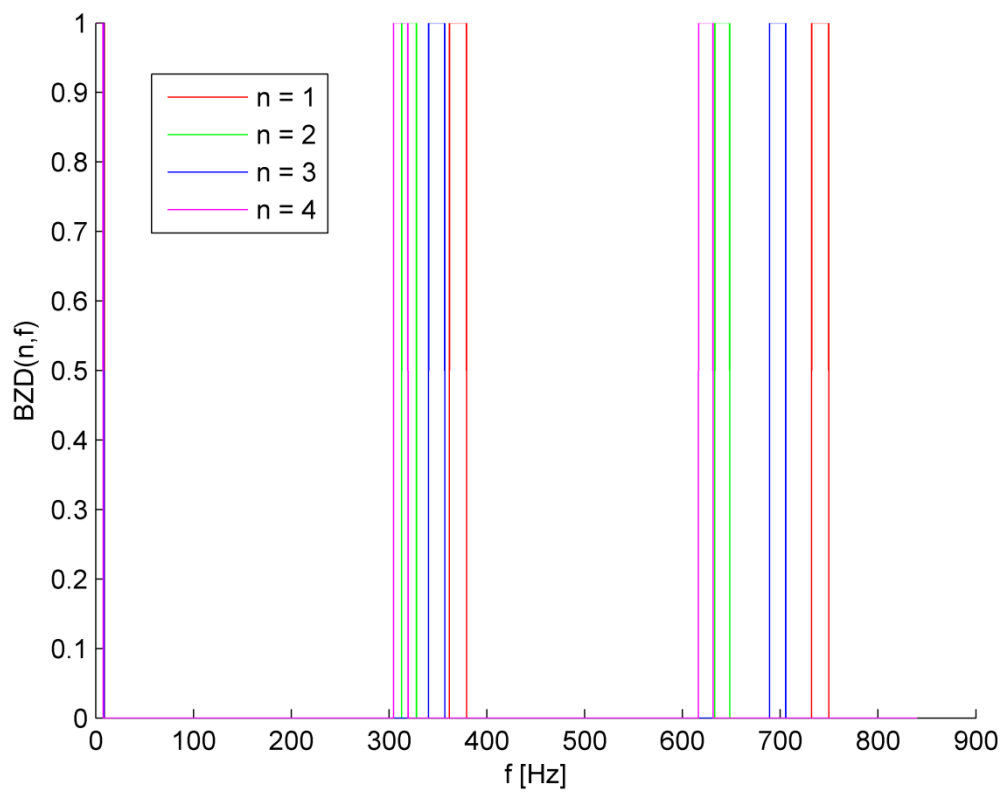


Sl. 17 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

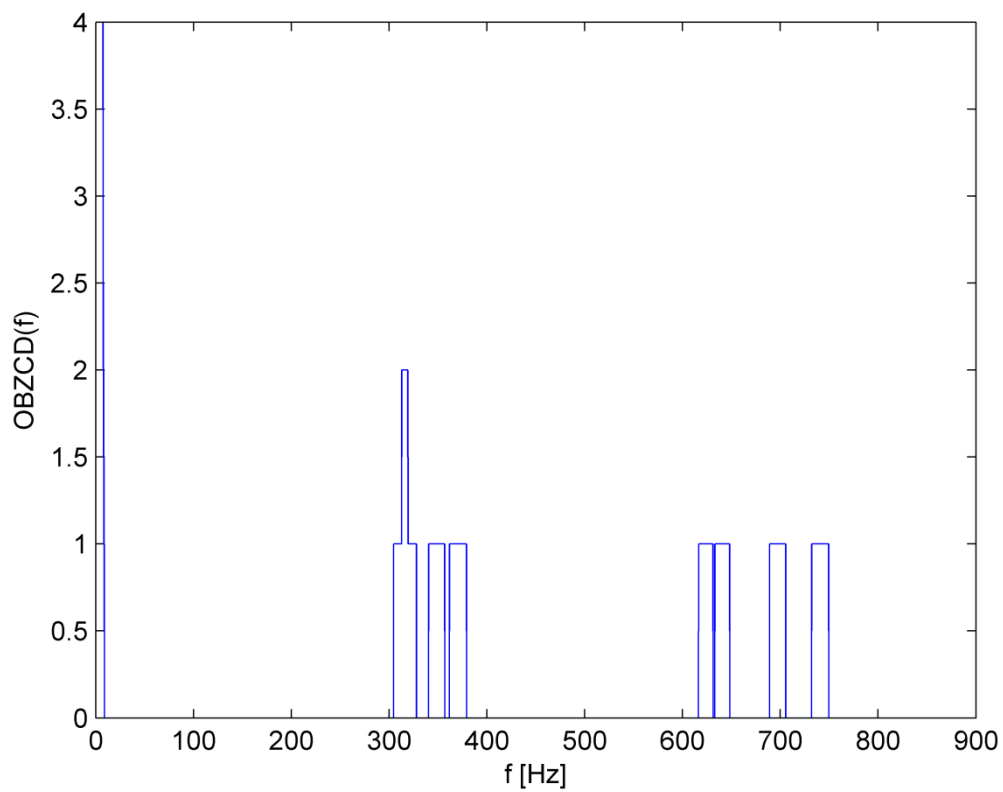
U Tab. 7 navedene su vrednosti parametara koji definišu MPCIPB (skup PRI/PRF, trajanja impulsa) i druge interesantne vrednosti, za dva moguća režima rada koji odgovaraju tačkama A i B na Sl. 13. Sa stanovišta M17, vrednost trajanja kratkog impulsa se može izabrati proizvoljno iz navedenog intervala, a u praktičnoj implementaciji bi ta odluka mogla da zavisi od korišćene unutar-impulsne modulacije i željene rezolucije po daljini. Na Sl. 18, Sl. 19, Sl. 20 i Sl. 21 prikazani su rasporedi slepih zona za sve PRF i rasporedi broja preklopljenih slepih zona u tačkama A i B.

Tab. 7 – Parametri MPCIPB za dva moguća režima rada.

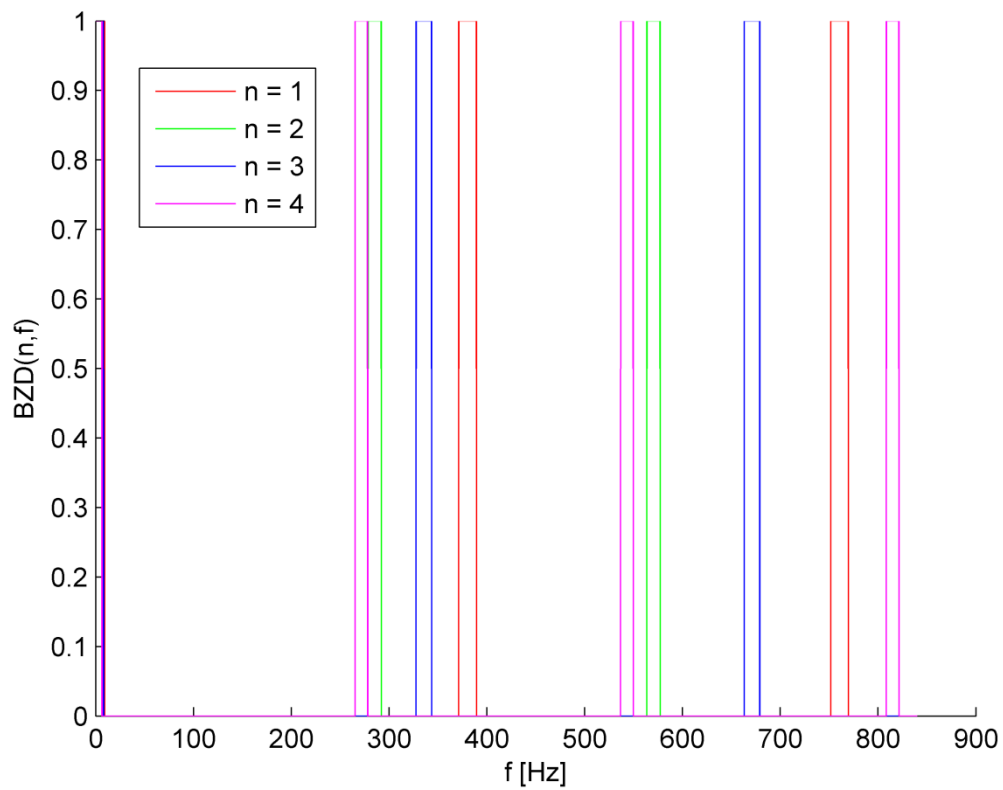
<i>Tačka u PF</i>	A (12.81, 98.26 %, -22.05 m/s)	B (10.13, 99.06 %, -24.37 m/s)
<i>Tačka u POS</i>	A (35, 270 μ s, 2.7 ms)	B (18, 230 μ s, 2.63 ms)
PRI_n [ms]	{2.7, 3.12, 2.87, 3.2}	{2.63, 3.51, 2.98, 3.68}
PRF_n [Hz]	{370.4, 320.3, 348.6, 311.9}	{380.2, 285.2, 335.5, 271.6}
τ_S [μ s]	[0.43, 10]	[0.19, 10]
τ_L [μ s]	270	230
F_B [Hz]	11851.85	5703.42
r_n	{32, 37, 34, 38}	{15, 20, 17, 21}
n_p	14	13
σ_{f_S} [Hz]	1.59	1.59
σ_f [Hz]	1.62	1.62
$f_C^*(n)$ [Hz]	{8.68, 7.51, 8.17, 7.31}	{8.91, 6.68, 7.86, 6.37}
$CA(f_C^*(n))$ [dB]	{70.7, 54.4, 63.4, 51.9}	{74, 44.2, 59, 40.6}



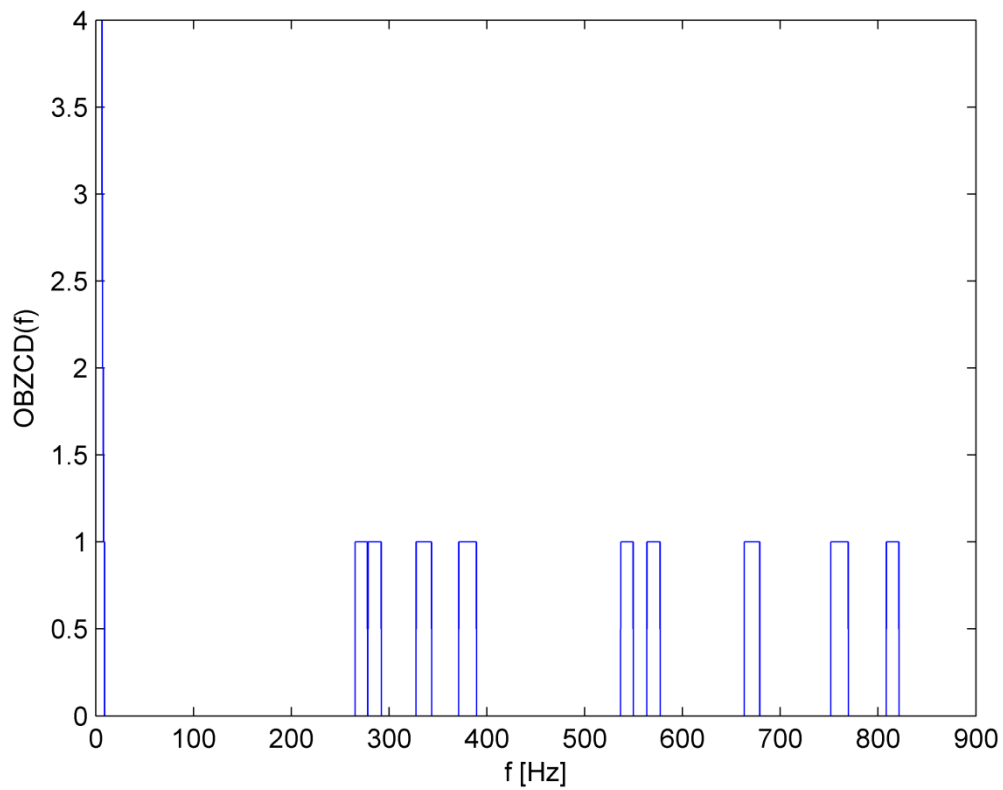
Sl. 18 – Raspored slepih zona za sve PRF u tački A PF.



Sl. 19 – Raspored broja preklopljenih slepih zona u tački A PF.



Sl. 20 – Raspored slepih zona za sve PRF u tački B PF.



Sl. 21 – Raspored broja preklapljenih slepih zona u tački B PF.

3.3 Matematički model M19

Matematički model višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB M19 je poboljšana verzija matematičkog modela M17. Objavljen je u [40]. U prvom delu ovog odeljka biće predstavljen M19, sa posebnim osvrtom na razlike u odnosu na M17. Pomenute razlike se odnose na uvođenje novog ograničenja kojim se iz dopustivog prostora odlučivanja isključuju određena rešenja, koja su kontradiktorna sa načinom funkcionisanja impulsnog Dopler radara, te unapređenje načina za određivanje širine osnovne slepe zone.

U drugom delu odeljka, M19 će biti primenjen na konkretnom primeru koji bi mogao da odgovara hipotetičkom savremenom VHF radaru. U pitanju je isti primer korišćen u analizi matematičkih modela M15 i M17. Analiziraće se zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja, a zatim će metodom iscrpne pretrage biti određeni egzakti POS i PF. Zatim će se analizirati kako bi donosilac odluke mogao a posteriori da artikuliše svoje preferencije, koristeći egzakti POS i PF.

3.3.1 Prikaz matematičkog modela M19

Elementi M19 koji su isti kao u M17 biće rekapitulirani radi kompletnosti i samosadržajnosti ovog odeljka, dok će novi ili izmenjeni elementi biti obrađeni sa više detalja.

Promenljive odlučivanja su iste kao u M15 i M17:

- željeno povećanje prve prave slepe Doplerove frekvencije, r^* ,
- trajanje dugog impulsa, τ_L ,
- najkraći PRI u skupu PRI, PRI_{min} .

Formalne definicije promenljivih odlučivanja x_1 , x_2 i x_3 , kao i vektora promenljivih odlučivanja \mathbf{x} za M179 navedene su u (55). Promenljiva r^* je prirodan broj, a promenljive τ_L i PRI_{min} su elementi diskretnih skupova prirodnih umnožaka koraka τ_{STEP} i PRI_{STEP} , repektivno.

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv r^*, & x_2 &\equiv \tau_L, & x_3 &\equiv PRI_{min} \\ \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \end{aligned} \quad (55)$$

Uočeno je da u matematičkim modelima M15 i M17 dopustivi prostor odlučivanja nije dobro definisan, jer je dozvoljeno postojanje rešenja u kojima postoji samo jedan elementarni talasni oblik u CPI, tj. $n_p = 1$, što je u kontradikciji sa načinom funkcionisanja impulsnog Dopler radara. Zato je neophodno uvesti dodatno ograničenje kojim se obezbeđuje $n_p \geq 2$.

Kombinovanjem uslova $n_p \geq 2$ sa izrazom (31) za n_p dobija se nejednakost (56).

$$2 \leq \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{N \cdot PRI_{min}} \right] \quad (56)$$

Na osnovu jed. 3.7.d u [42] važi ekvivalencija (57).

$$2 \leq \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{N \cdot PRI_{min}} \right] \Leftrightarrow 2 \leq \frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{N \cdot PRI_{min}} \quad (57)$$

Rearanžiranjem nejednakosti sa desne strane ekvivalencije (57) dobija se ograničenje (58) koje obezbeđuje $n_p \geq 2$.

$$PRI_{min} \leq \frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{2 \cdot N} \quad (58)$$

Dopustivi prostor odlučivanja \mathbf{X} za M19, određen sa 6 ograničenja tipa nejednakosti, formalno je definisan u (59). Funkcije ograničenja od $g_1(\mathbf{x})$ do $g_5(\mathbf{x})$ iste su kao u M15 i M17, dok je dodatna funkcija ograničenja $g_6(\mathbf{x})$ dobijena rearanžiranjem izraza (58).

Prva funkcija cilja u M19 je ista kao u M15 i M17, odnos primljenog signala i šuma kada se objekat na instrumentalnoj daljini „osvetli“ dugim impulsom SNR_L .

Druga funkcija cilja u M19 ista je kao u M17, procenat Doplerove vidljivosti DVP , definisan kao procenat opsega Doplerovih frekvencija od interesa koji nije prekriven višestrukim slepim zonama. Kao što je rečeno u opisu M17, ključni korak za izračunavanje DVP je određivanje širine osnovne slepe zone $\Delta v_b(n)$ za sve PRF. Određivanje $\Delta v_b(n)$ zasniva se na modelu spektralnih karakteristika klatera i modelu procesa cenzurisanja Dopler filtara.

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, 6\} \\ g_1(\mathbf{x}) &= r^* - \Delta f_{ua} \cdot \frac{2R_I}{c} + \Delta r_{min} \\ g_2(\mathbf{x}) &= \sqrt[5]{\frac{1}{Q_{SNR}} \cdot \frac{2R_{min}}{c} \cdot \left(\frac{2R_I}{c}\right)^4} - \tau_L \\ g_3(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{2R_I}{c} - \tau_L \\ g_4(\mathbf{x}) &= PRI_{min} - \frac{1}{D} \cdot \tau_L \\ g_5(\mathbf{x}) &= \frac{r^* + \Delta r_{min}}{\Delta f_{ua}} - PRI_{min} \\ g_6(\mathbf{x}) &= \frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{2 \cdot N} - PRI_{min} \end{aligned} \quad (59)$$

U M19 je zadržan isti model spektralnih karakteristika klatera kao u M17, Gausovski model. Po tom modelu, spektralna gustina snage klatera ima oblik Gausove krive. U M19 je, kao u M17,

usvojeno da je Gausova kriva centrirana na nultoj frekvenciji, čime se modeluje stacionarni klater koji potiče od reljefnih formacija i drugih stacionarnih objekata na površini Zemlje. Standardna devijacija spektra klatera σ_f određena je izrazom (60).

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{fw}^2 + \sigma_{fs}^2} \quad (60)$$

U jednakosti (60), σ_{fw} je standardna devijacija klatera usled vetra i parametar je matematičkog modela, dok je σ_{fs} standardna devijacija spektra klatera usled skeniranja antene, određena izrazom (61), koji je dobijen kombinovanjem (16), (31) i (40). Iz izraza (61) očigledno je da je zavisnost σ_{fs} od promenljivih r^* i PRI_{min} vrlo složena, što uključuje testeraste oscilacije, ali je samo posmatranjem formule teško predvideti da li postoje trendovi rasta ili opadanja.

$$\sigma_{fs} = \frac{0.265}{\frac{r^* + \Delta r_{avg}}{r^* + \Delta r_{min}} \cdot PRI_{min} \cdot N \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right]} \quad (61)$$

Kada je u pitanju model procesa cenzurisanja Dopler filtera u M17, uočene su određene nesavršenosti:

- Pretpostavljeno je da dužina DFT N_{DFT} , koja je jednaka ukupnom broju Dopler filtera, može da ima proizvoljnu vrednost, dok je u [13] preporučeno da broj Dopler filtera bude jednak broju PRI u CPI n_p ;
- Određivanje širine osnovne slepe zone zasniva se na računanju CA, po formuli (43) koja je nastala na osnovu 17.20 iz [4]. Problem sa formulom (43) je što nije normalizovana. Naime, integral za izračunavanje snage klatera na izlazu iz procesora (u imeniocu razlomka) uključuje amplitudsku frekventnu karakteristiku Dopler filtra, dok integral za izračunavanje snage klatera na ulazu u procesor (u brojiocu razlomka) ne uključuje amplitudsku frekventnu karakteristiku Dopler filtra. Posledica navedenog je da CA zavisi od skaliranja koeficijenata Dopler filtra. U M17, efekti odbacivanja spektralnih odbiraka aproksimirani su idealnim visokopropusnim Dopler filtrom, pri čemu je usvojeno da je amplituda u propusnom opsegu 1. Međutim, ako bi se usvojila neka druga vrednost amplitude u propusnom opsegu, dobio bi se drugačiji rezultat za CA, a time i za širinu osnovne slepe zone, i konačno za DVP, što nije korektno.

Prvi od navedenih problema se može lako rešiti usvajanjem $N_{DFT} = n_p$, što je i učinjeno u M19. Usled toga, N_{DFT} nije parametar M19.

Da bi se korigovao drugi problem, najpre je razmotrena ideja pronalaženja alternativne definicije za CA, tako da se ukloni zavisnost od skaliranja Dopler filtra. Pregledom nekoliko

referenci iz oblasti radarske tehnike, kao što su [3], [4], [5], [43] i [44], uočeno je da u literaturi postoji nekoliko različitih definicija CA, što unosi dodatnu konfuziju kada je u pitanju rešavanje predmetnog problema. Deluje da bi se problemu definisanja CA mogla posvetiti zasebna studija, pa je odlučeno da se odustane od izračunavanja *DVP* na bazi CA, već da se potraži alternativna metoda.

U [13] je predstavljen aproksimativni pristup za određivanje broja Dopler filtera zaslepljenih klaterom, na osnovu čega se može odrediti i širina osnovne slepe zone. Pristup se zasniva na poređenju graničnih učestanosti klatera (za koji se smatra da je ograničen u spektru) i učestanosti prvih nula (nakon glavnog loba) Dopler filtra. Ako spektralni interval zahvaćen klaterom zalazi u glavni lob Dopler filtra, filter se smatra zaslepljenim (eng. blinded).

Rihaczek [13] je zapazio da je veoma pogodan slučaj kada se ivica klatera poklapa sa centrom jednog od Dopler filtara (a time nulom susednog Dopler filtra), jer se tada minimizira broj zaslepljenih Dopler filtara. Izraz koji opisuje relaciju između broja zaslepljenih Dopler filtara i maksimalne dozvoljene širine klatera naveden u jed. 6 u [13] odnosi se na taj slučaj. Ako sa $\Delta v_{cl,max}$ označimo maksimalnu dozvoljenu širinu spektra klatera koji zaslepljuje n_f Dopler filtara, koji imaju Rejljevsku širinu (od centra do prve nule) w_{10} , pomenuti Rihaczek-ov izraz, preuzet iz [13] je (62).

$$\Delta v_{cl,max} = (n_f - 1) \cdot w_{10} \quad (62)$$

Za problem optimalnog izbora MPCIPB, relevantan je drugi slučaj, kada se centar klatera poklapa sa centrom nultog Dopler filtra (čija centralna učestanost je 0). Ovaj slučaj odgovara zemaljskom stacionarnom klateru čiji spektar je simetričan u odnosu na 0, uz obradu pomoću DFT kao banke Dopler filtara. Ispostavlja se da i za ovaj slučaj važi (62), uz bitnu razliku da je broj zaslepljenih filtara n_f uvek neparan! Zato je pogodno uvesti novu veličinu k_f , tako da važi (63). Kada bi spektar klatera imao oblik Dirakovog impulsa, tj. kada ne bi dolazilo do širenja spektra klatera, bio bi zaslepljen samo nulti Doplerov filter, jer bi Dirakov impuls bio u nulama ostalih filtara. Tada bi veličina k_f mogla da ima i vrednost 0. Međutim, pošto pomenut slučaj nije realističan, usvojeno je $k_f \in \mathbb{N}$, tako da će uvek biti zaslepljena najmanje tri Dopler filtra.

$$n_f = 2 \cdot k_f + 1; \quad k_f \in \mathbb{N} \quad (63)$$

Ispostavlja se da između $\Delta v_{cl,max}$ i k_f važi relacija (64).

$$\Delta v_{cl,max} = k_f \cdot 2 \cdot w_{10}. \quad (64)$$

Da bi se utvrdilo kako k_f i n_f zavise od širine spektra klatera, Δv_{cl} , treba najpre uočiti da na osnovu (64) važi nejednakost (65), čijim rearanžiranjem se dobija nejednakost (66).

$$\Delta v_{cl} \leq k_f \cdot 2 \cdot w_{10} \quad (65)$$

$$k_f \geq \frac{\Delta v_{cl}}{2 \cdot w_{10}} \quad (66)$$

Pošto je k_f prirodan broj, najmanja vrednost koju može imati je određena jednakošću (67), iz čega sledi da za broj zaslepljenih filtera važi (68).

$$k_f = \left\lceil \frac{\Delta v_{cl}}{2 \cdot w_{10}} \right\rceil \quad (67)$$

$$n_f = 2 \cdot \left\lceil \frac{\Delta v_{cl}}{2 \cdot w_{10}} \right\rceil + 1 \quad (68)$$

Međutim, da bi se odredio broj zaslepljenih filtera, n_f , potrebno je utvrditi širinu spektra klatera, Δv_{cl} . U M19 je usvojen Gausovski model klatera, pa je striktno govoreći širina spektra klatera beskonačna. Ipak, najveći deo snage klatera skoncentrisan je oko centra Gausove krive, pa je moguće napraviti spektralno ograničenu aproksimaciju. Snaga klatera izvan ± 4 standardne devijacije od centra Gausove krive, manja je preko 15000 puta, tj. za više od 40 dB od ukupne snage klatera. Na osnovu pomenute činjenice usvojena je aproksimacija (69), gde je σ_f definisana izrazima (60) i (61).

$$\Delta v_{cl} \approx 8 \cdot \sigma_f \quad (69)$$

Rejljeva širina Dopler filtra w_{10} za n -ti PRF određena je izrazom (70), imajući u vidu da važi $N_{DFT} = n_p$. Kombinovanjem (15), (31) i (70), dobija se (71).

$$w_{10}(n) = \frac{1}{n_p \cdot PRI_n}, n = 1, 2, \dots, N \quad (70)$$

$$w_{10}(n) = \frac{1}{\left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right] \cdot \frac{r^* + \Delta r_n}{r^* + \Delta r_{min}} \cdot PRI_{min}}, n = 1, 2, \dots, N \quad (71)$$

Prema jed. 1 u [13], širina osnovne slepe zone određena je izrazom (72). Kombinovanjem ovog izraza sa (68), dobija se (73). Posmatranjem ovog izraza, a imajući u vidu složenost izraza za σ_f i $w_{10}(n)$, jasno je da je zavisnost $\Delta v_b(n)$ od promenljivih r^* i PRI_{min} veoma složena.

$$\Delta v_b = n_f \cdot w_{10}. \quad (72)$$

$$\Delta v_b(n) = \left(2 \left\lceil \frac{4\sigma_f}{w_{10}(n)} \right\rceil + 1 \right) w_{10}(n), n = 1, 2, \dots, N \quad (73)$$

Na osnovu širine osnovne slepe zone $\Delta v_b(n)$, DVP se računa na isti način kao u M17, što je opisano izrazima (74), (75), (76) i (77), gde funkcija $BZD(n, f)$ opisuje raspored slepih zona za n -ti PRI, funkcija $OBZCD(f)$ opisuje raspored broja preklopljenih slepih zona, a funkcija $MBZD(f)$ opisuje raspored višestrukih slepih zona. $f_{max} = 2v_{max}/\lambda$ je apsolutna vrednost maksimalne Doplerove frekvencije od interesa.

$$BZD(n, f) = \begin{cases} 1; f \in \left[\frac{k}{PRI_n} - \frac{\Delta v_b(n)}{2}, \frac{k}{PRI_n} + \frac{\Delta v_b(n)}{2} \right], k \in \mathbb{Z} \\ 0; f \notin \left[\frac{k}{PRI_n} - \frac{\Delta v_b(n)}{2}, \frac{k}{PRI_n} + \frac{\Delta v_b(n)}{2} \right], k \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (74)$$

$$OBZCD(f) = \sum_{n=1}^N BZD(n, f) \quad (75)$$

$$MBZD(f) = \begin{cases} 1; OBZCD(f) > 1 \\ 0; OBZCD(f) \leq 1 \end{cases} \quad (76)$$

$$DVP = \frac{\int_0^{f_{max}} [1 - MBZD(f)] df}{f_{max}} \cdot 100\% \quad (77)$$

Treća funkcija cilja je ista kao u M17, tj. negirana najveća rezolucija po radijalnoj brzini $-VR_{max}$.

Formalne definicije funkcija cilja $F_1(\mathbf{x})$, $F_2(\mathbf{x})$ i $F_3(\mathbf{x})$, kao i vektora funkcija cilja $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ za M19 navedene su u (78).

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{x}) &\equiv SNR_L = C_{SNR} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right] \cdot \tau_L \\ F_2(\mathbf{x}) &\equiv DVP = \frac{\int_0^{f_{max}} [1 - MBZD(f)] df}{f_{max}} \cdot 100\% \\ F_3(\mathbf{x}) &\equiv -VR_{max} = - \frac{1}{PRI_{min} \cdot \left[\frac{\theta_3}{\omega} \cdot \frac{r^* + \Delta r_{min}}{r^* + \Delta r_{avg}} \cdot \frac{1}{PRI_{min} \cdot N} \right]} \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [F_1(\mathbf{x}) \quad F_2(\mathbf{x}) \quad F_3(\mathbf{x})]^T \end{aligned} \quad (78)$$

Dopustivi prostor ciljeva \mathbf{Z} za M19 definisan je u (53), na isti način kao u M15 i M17.

$$\mathbf{Z} = \{\mathbf{F}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\} \quad (79)$$

Ovim je potpuno definisan matematički model M19 višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB. Sam višeciljni optimizacioni problem definisan je u (80).

$$\mathbf{x}^* = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} F(\mathbf{x}) \text{ s. t. } g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (80)$$

3.3.2 Analiza karakteristika matematičkog modela M19, optimizacija metodom iscrpne pretrage i diskusija

Slično kao u slučaju M17, i ovde se analizom formula za SNR_L i $-VR_{\max}$ u (78) može načelno predvideti kako će promenljive odlučivanja uticati na ove funkcije cilja. Pošto su pomenute funkcije cilja iste kao u M17, i predviđanja su ista. Slično kao u M17, funkcija cilja DVP nije zadata eksplicitno, već podrazumeva niz međukoraka koji uključuju i integraljenje. Pored toga, izrazi za σ_f i $w_{10}(n)$ koji se koriste u međukoracima uključuju formu gde se promenljive odlučivanja r^* i PRI_{\min} pojavljuju i unutar i van operatora zaokruživanja na dole. Zato je teško predvideti kako će DVP zavisiti od r^* i PRI_{\min} . Pretpostavlja se da će postojati testeraste oscilacije sa oblastima kontinualnog rasta ili pada i diskontinuitetima tipa skokovitog rasta ili pada. Kada je u pitanju PRI_{\min} , porast će izazvati smanjenje svih PRF, što bi moglo da rezultuje trendom opadanja DVP , kao što je pretpostavljeno, a zatim i potvrđeno u M17, ali najverovatnije sa prisustvom lokalnih anomalija.

U Tab. 8 sumirano je kako očekujemo da će se menjati vrednosti funkcija cilja kada se povećavaju vrednosti promenljivih odlučivanja. Potencijal za konflikte među funkcijama cilja postoji u pogledu menjanja vrednosti r^* i PRI_{\min} . Prema tome, slično kao u analizi M15 i M17, može se pretpostaviti da optimalno rešenje \mathbf{x}^* problema definisanog u (80) neće biti jedinstveno, već će postojati više PO rešenja.

Tab. 8 – Očekivana zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja.

	$x_1 \equiv r^* \uparrow$	$x_2 \equiv \tau_L \uparrow$	$x_3 \equiv PRI_{\min} \uparrow$
$F_1(\mathbf{x}) \equiv SNR_L$	↑ (stepenice)	↑	↓ (stepenice)
$F_2(\mathbf{x}) \equiv DVP$	↓	(nema uticaja)	↓ (trend)
$F_3(\mathbf{x}) \equiv -VR_{\max}$	↑ (stepenice)	(nema uticaja)	↑ (testera)

Na osnovu zaključaka o benefitima ograničavanja promenljive r^* sa gornje strane iz analize karakteristika matematičkog modela M15, isti princip usvojen je i za M19, tj, za potrebe praktične primene matematičkog modela M19 mora da važi $r^* \leq r_{UL}^*$, čime je obezbeđeno da dopustivi prostor odlučivanja sadrži konačan broj tačaka.

Radi podrobnije analize karakteristika M19, primenjena je numerička simulacija, na konkretnom primeru hipotetičkog savremenog VHF radara. Usvojeni parametri M19 navedeni su u Tab. 9 i imaju iste vrednosti kao i u slučaju M17 (videti Tab. 6), sa tom razlikom da M19 nema parametre N_{DFT} i CA_{min} .

Gornja granica za r^* postavljena je na $r_{UL}^* = 35$, isto kao u analizi karakteristika M15 i M17. Pod tim uslovom i sa vrednostima parametara iz Tab. 9 utvrđeno je da je ukupan broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja 1102106, što je manje nego prilikom analize M15 i M17. Razlika se može objasniti uvođenjem dodatnog ograničenja u M19. Nakon pronalaženja svih tačaka dopustivog prostora odlučivanja, za svaku od njih izračunate su vrednosti funkcija cilja.

Tab. 9 – Parametri matematičkog modela M19 koji odgovaraju hipotetičkom savremenom VHF radaru. Translated by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 [40].

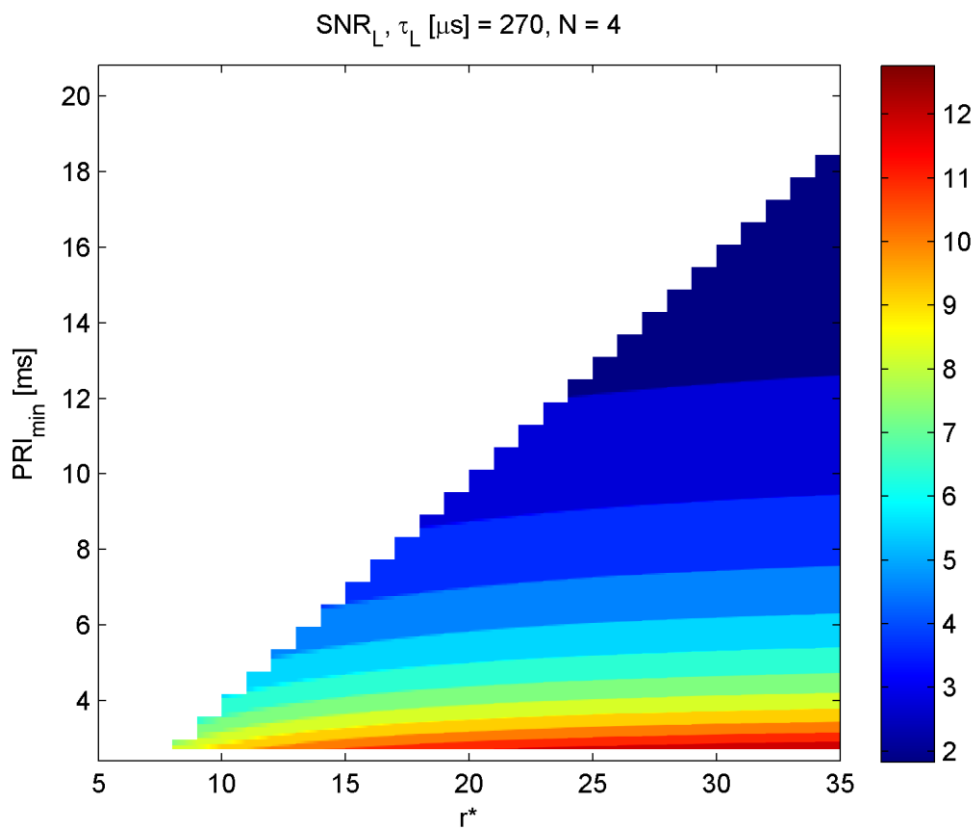
<i>Parametar</i>	<i>Vrednost</i>
P_t	8 kW
G	426
λ	1.6667 m
T_0	290 K
θ_3	6 °
ω	36 °/s
F	1.6965
L_S	26.3027
σ	5 m ²
R_{min}	1.5 km
R_I	360 km
v_{max}	700 m/s
D	0.1
Q_{SNR}	10
N	4
τ_{STEP}	10 μs
PRI_{STEP}	10 μs
σ_{fw}	0.3 Hz

Zavisnost funkcije cilja SNR_L od promenljivih odlučivanja r^* i PRI_{min} , za fiksnu vrednost promenljive τ_L , prikazana je na Sl. 22. Linearna zavisnost SNR_L od τ_L je očigledna iz formule za SNR_L u (78), pa nema potrebe za grafičkim prikazivanjem te zavisnosti. Zavisnost funkcija cilja DVP i $-VR_{max}$ od promenljivih odlučivanja r^* i PRI_{min} , prikazana je na Sl. 23 i Sl. 24,

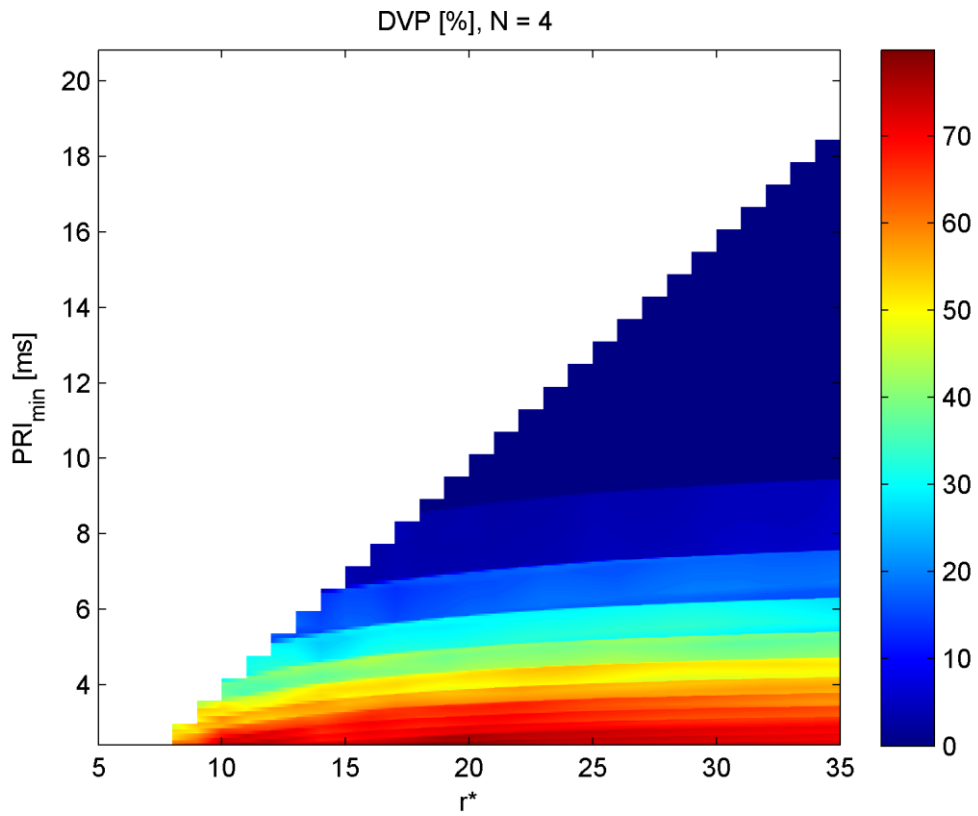
respektivno. Zavisnost funkcija cilja od promenljivih odlučivanja uglavnom jeste u skladu sa očekivanjima iz Tab. 8.

Grafici zavisnosti funkcija cilja SNR_L i $-VR_{max}$ od r^* i PRI_{min} za M19 veoma su slični odgovarajućim graficima za M17, što je i očekivano, obzirom da pomenute funkcije cilja nisu menjane. Male razlike koje postoje, a mogu se uočiti po drugačijim opsezima vrednosti funkcija cilja, posledica su novog ograničenja koje je dodato u M19. Grafik zavisnosti DVP od r^* i PRI_{min} za M19 je drugačiji u odnosu na odgovarajući grafik za M17, usled drugačijeg računanja $\Delta v_b(n)$.

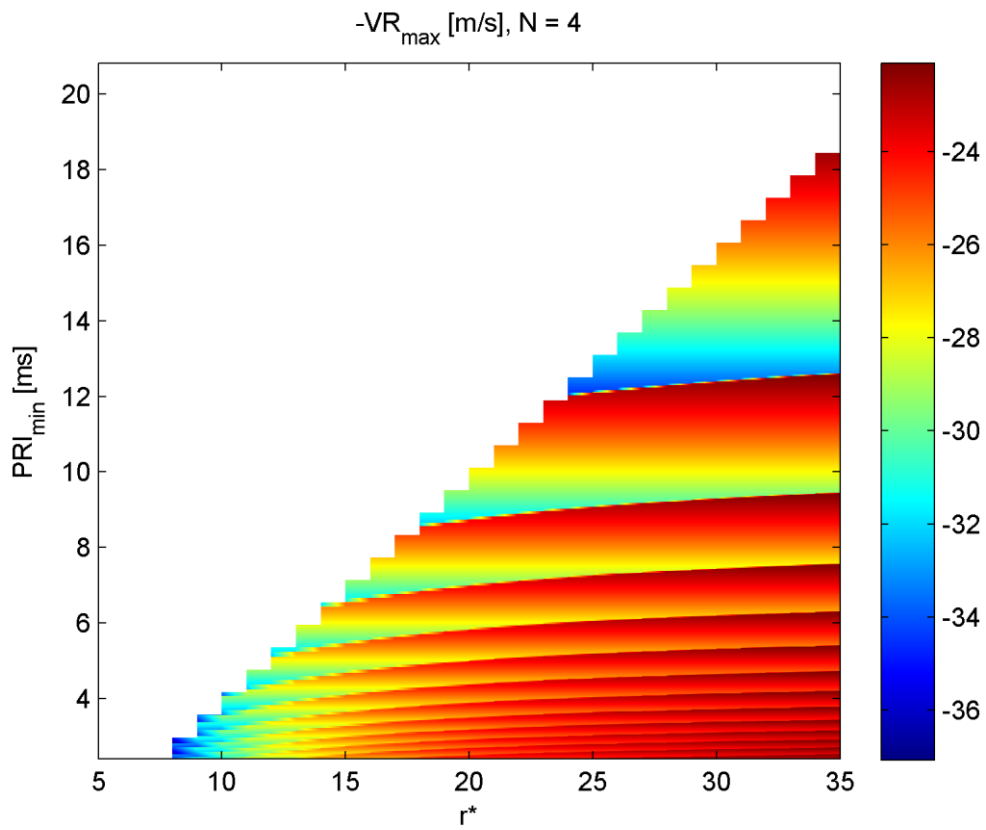
Prva stvar koja se primećuje kada se uporede grafici DVP za M19 (Sl. 23) i M17 (Sl. 11) su značajne razlike u opsezima vrednosti DVP . Dok u M17 vrednost DVP može da dosegne i preko 99%, u M19 je maksimalna vrednost DVP malo iznad 80%! Slično je i za minimalne vrednosti – u M17 DVP ne pada ispod 26%, dok u M19 dolazi i do 0%! Iznete činjenice pokazuju da je M17 previše optimističan u pogledu vrednosti DVP , što je najverovatnije posledica ranije pomenutih nesavršenosti u načinu izračunavanja širine osnovne slepe zone. DVP u M19 pokazuje jasan trend opadanja sa porastom PRI_{min} uz postojanje testerastih oscilacija. Oscilacije vrednosti DVP se uočavaju i u odnosu na porast r^* . Lokalne anomalije su manje izražene u odnosu na M17. Najznačajniji konflikt među funkcijama cilja može se očekivati u donjem desnom delu ravni određenoj promenljivama r^* i PRI_{min} , gde sa porastom r^* SNR_L raste, a DVP opada.



Sl. 22 – Zavisnost SNR_L od r^* i PRI_{min} , za fiksnu vrednost τ_L .



Sl. 23 – Zavisnost DVP od r^ i PRI_{min} .*



Sl. 24 – Zavisnost $-VR_{max}$ od r^ i PRI_{min} .*

Pošto su enumerisane sve tačke u dopustivom prostoru odlučivanja, POS i PF su određeni metodom iscrpne pretrage, poređenjem, po vrednostima funkcija cilja, svake tačke u dopustivom prostoru odlučivanja sa svim ostalim tačkama u dopustivom prostoru odlučivanja.

Dopustivi prostor ciljeva i PF prikazani su na Sl. 25, dok su dopustivi prostor odlučivanja i POS zbog preglednosti prikazani deo po deo na četiri slike Sl. 26, Sl. 27, Sl. 28 i Sl. 29. Posebno interesantne tačke PF i odgovarajuće tačke POS (označene istim slovima) navedene su u Tab. 10.

Tab. 10 – Posebno interesantne tačke u PF i tačke POS koje se u njih preslikavaju.

Oznaka tačke	$(SNR_L, DVP [\%], -VR_{max} [m/s])$	$(r^*, \tau_L [\mu s], PRI_{min} [ms])$
A	(12.81, 71.82, -22.05)	(35, 270, 2.7)
B	(11.01, 77.08, -24.19)	(20, 250, 2.65)
C	(3.388, 0, -22.03)	(35, 500, 18.91)
D	(11.86, 73.54, -22.46)	(30, 250, 2.65)
E	(0.4734, 80.16 , -24.7)	(17, 10, 2.41)
F	(6.098, 72.55, -22.05)	(35, 120, 2.52)
G	(1.016, 75.91, -22.96)	(25, 20, 2.42)

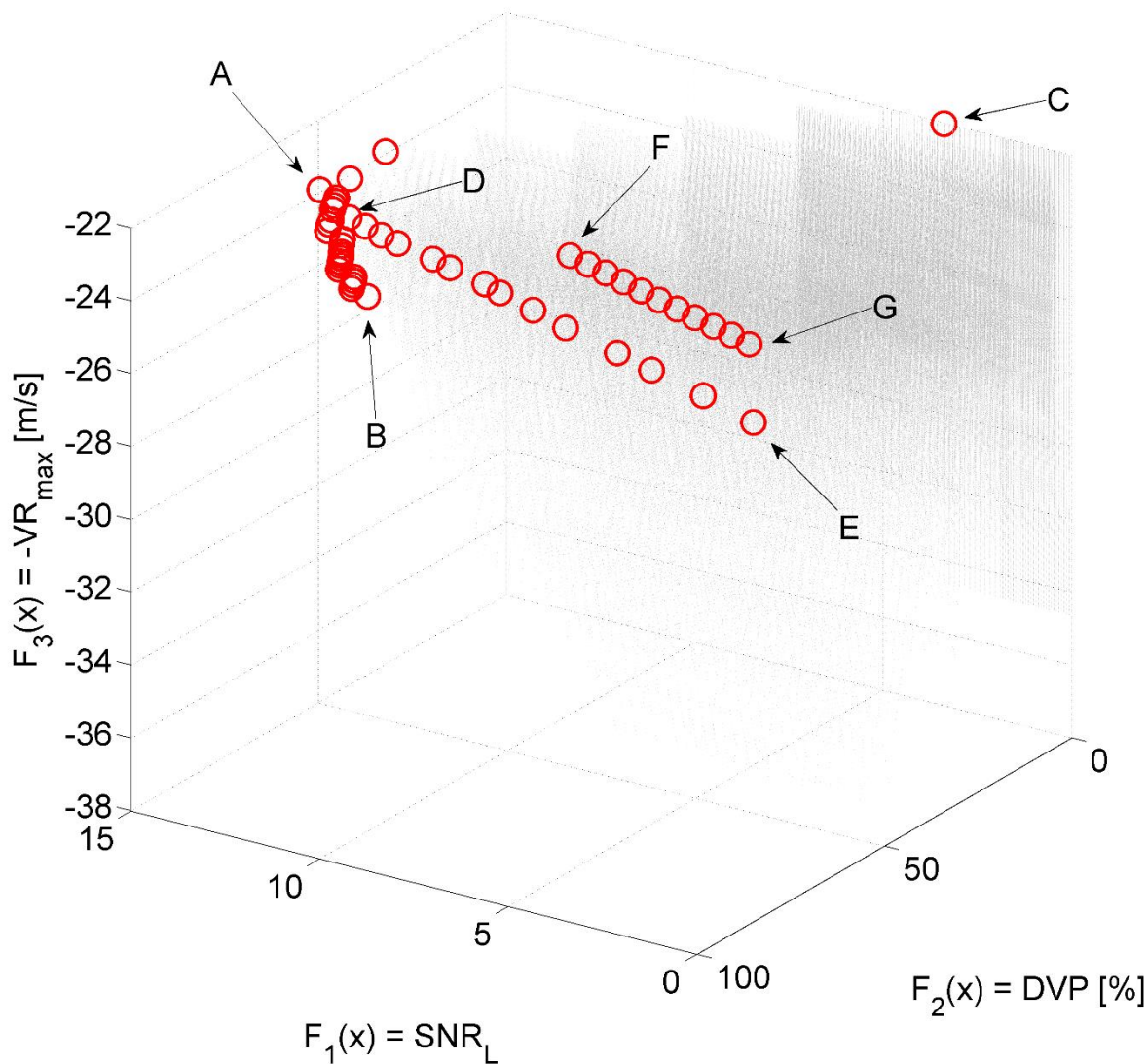
Tačke A, E i C su tačke PF koje odgovaraju maksimalnim vrednostima funkcija cilja SNR_L , DVP i $-VR_{max}$, respektivno. Posmatranjem Sl. 25 može se videti da PF ima četiri kraka:

- Krak A-B, koji se sastoji od tačaka A, B i svih tačaka PF između njih,
- Krak A-C, koji se sastoji od tačke C i dve tačke PF neposredno desno od tačke A,
- Krak D-E, koji se sastoji od tačaka D, E i svih tačaka PF između njih,
- Krak F-G, koji se sastoji od tačaka F, G i svih tačaka PF između njih.

Krak A-B, slično kao u M17, između funkcija cilja nudi trampu, koja je od praktičnog značaja. Prelaskom iz B u A, SNR_L se povećava 1.16 puta (relativno poboljšanje 16%), a $-VR_{max}$ za 2.14 m/s (relativno poboljšanje 8.8%), na račun apsolutnog smanjenja DVP od 5.26% (relativno pogoršanje 6,8%). Druge tačke kraka A-B nude mnoštvo različitih stepeni kompromisa između krajnosti određenih tačkama A i B. Krak A-C, kao i u M17, u poređenju sa tačkom A pruža zanemarljivo povećanje $-VR_{max}$ na račun značajnog smanjenja SNR_L i/ili DVP , pri čemu u tački C vrednost DVP čak pada na 0%! Stoga je krak A-C potpuno irelevantan za donosioca odluke.

Krak D-E je karakterističan po tome da je u tački E maksimalna vrednost DVP , na uštrb minimalnih vrednosti druge dve funkcije cilja, što je pogotovo bitno u slučaju SNR_L koji u tački E ima nedopustivno malu vrednost, manju od 1. Vrednosti DVP u delu kraka D-E blizu tačke E veće su od najveće vrednosti DVP u kraku A-B, tj. u tački B, ali opet na uštrb znatno manjih vrednosti SNR_L u odnosu na tačku B. U delu kraka D-E blizu tačke D, vrednosti $-VR_{max}$ su malo bolje nego

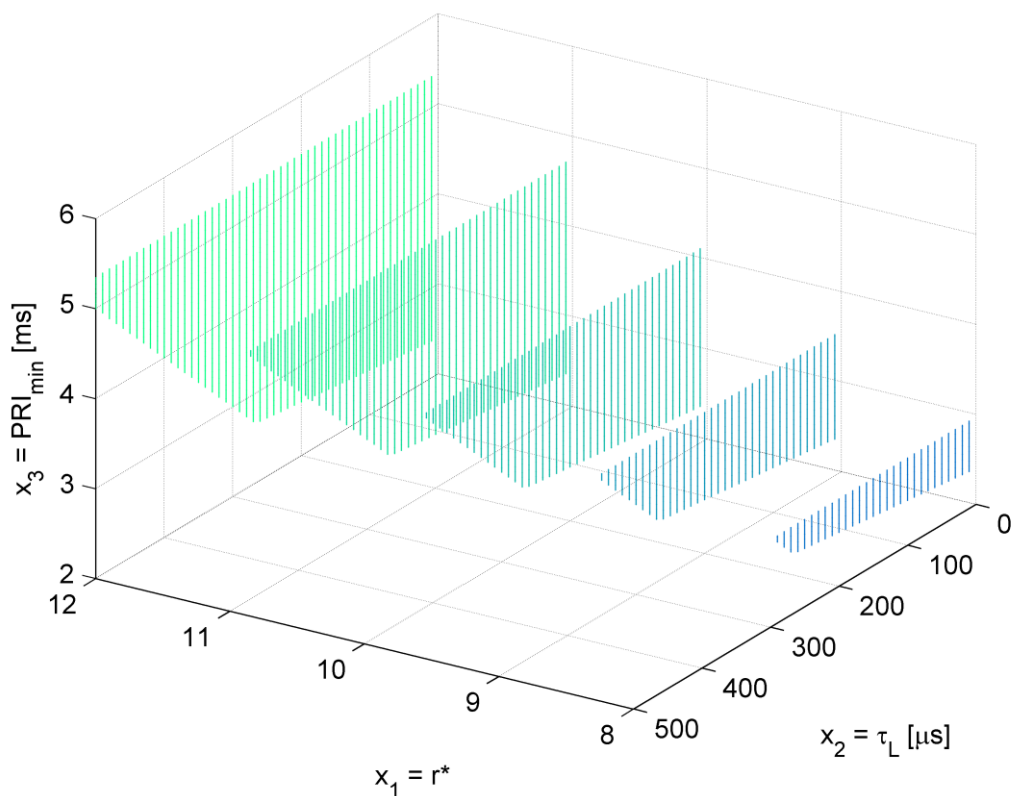
u tačkama kraka A-B koje imaju sličnu kombinaciju vrednosti druge dve funkcije cilja. Međutim, prednost kraka D-E u pogledu vrednosti $-VR_{max}$ je reda veličine 0.5 m/s, što nema veliki značaj. Prema tome, ni krak D-E suštinski nije relevantan za proces donošenja odluke.



Sl. 25 – Dopustivi prostor ciljeva (sivo) i PF (crveno). [Adapted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 \[40\].](#)

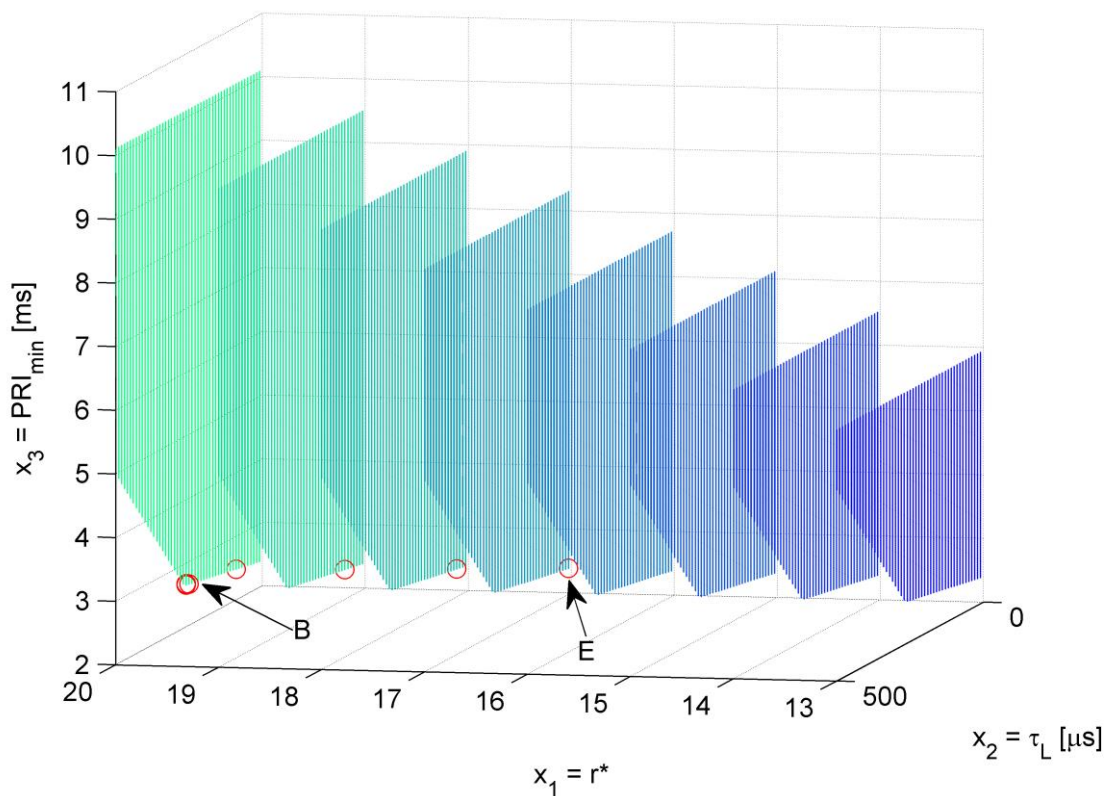
U odnosu na krak A-B, krak F-G nudi nešto veće vrednosti DVP za slične vrednosti $-VR_{max}$, na uštrb znatno manjih vrednosti SNR_L , koje se bliže vrednosti 1 kako se ide ka tački G. Zato ni krak F-G nije relevantan sa stanovišta izbora PO rešenja koje je najusklađenije sa preferencijama donosioca odluke.

Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 8 do 12

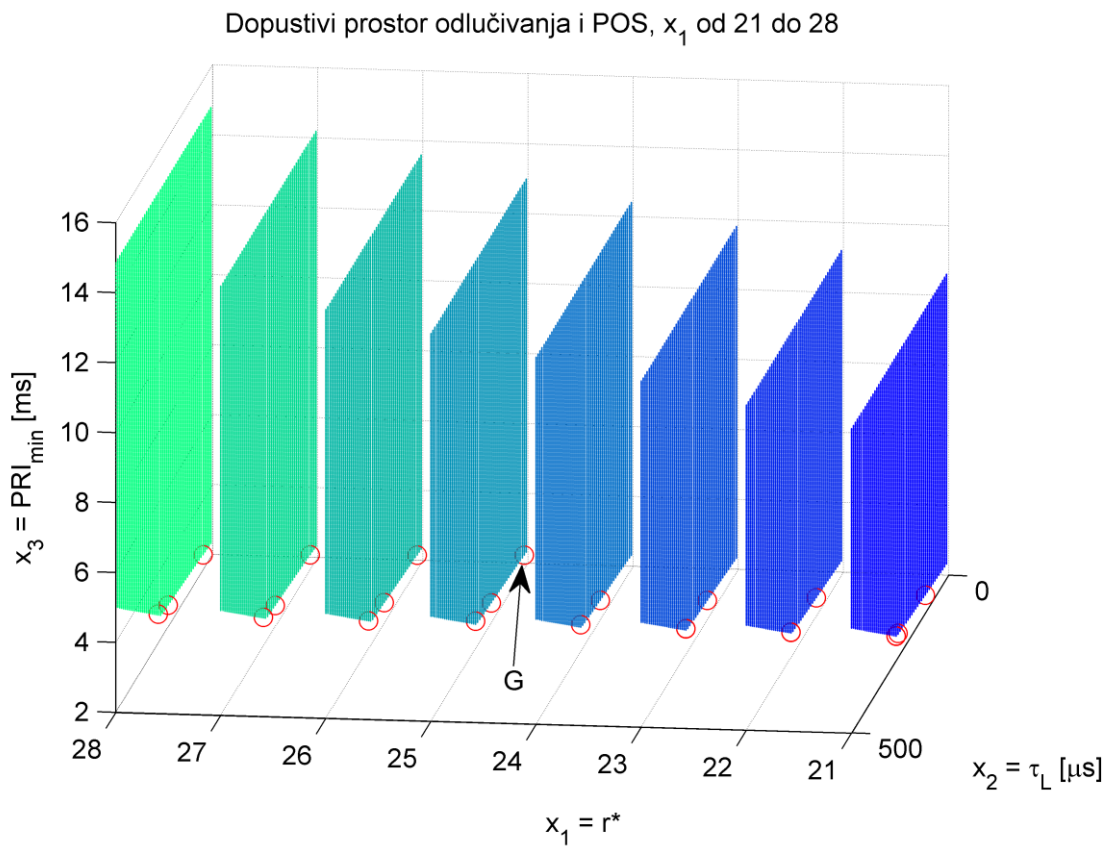


Sl. 26 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

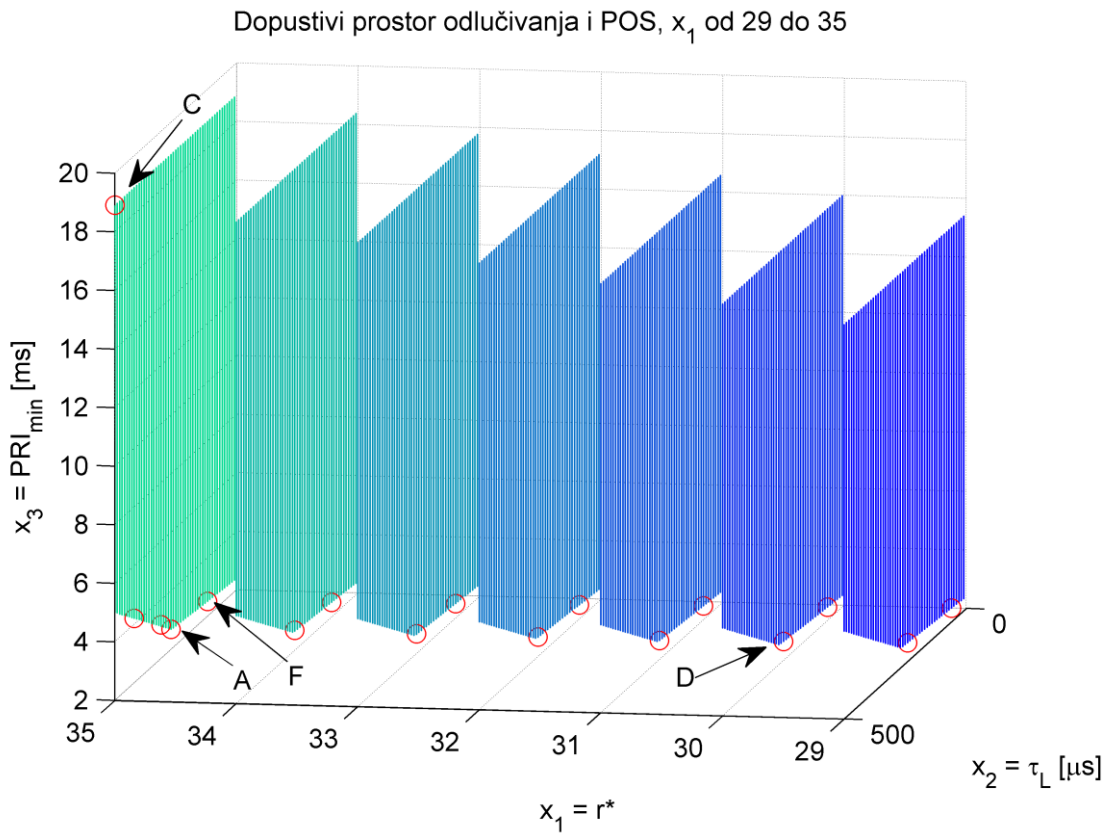
Dopustivi prostor odlučivanja i POS, x_1 od 13 do 20



Sl. 27 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).



Sl. 28 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).



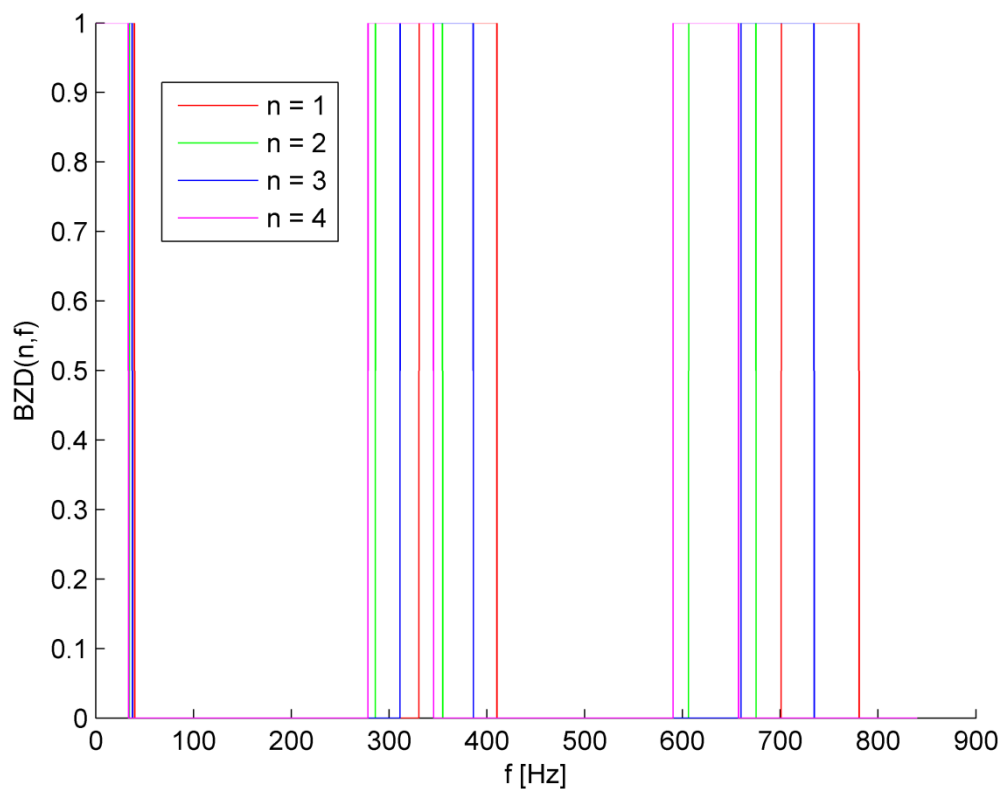
Sl. 29 – Deo dopustivog prostora odlučivanja (plavo-zeleno) i POS (crveno).

Slično kao u M17, PF u M19 omogućava među ciljevima trampu od praktičnog značaja samo u jednom svom delu, kraku A-B, kojeg bi jedino i trebalo da razmatra donosilac odluke prilikom a posteriori artikulacije preferencija. Donosilac odluke bi trebalo da izabere tačku A, tačku B ili jednu od tačaka između njih, u zavisnosti da li mu je i koliko bitnija Doplerova vidljivost ili maksimalna daljina otkrivanja. U okviru kraka A-B SNR_L i $-VR_{max}$ nisu u međusobnom konfliktu što bi trebalo da olakša donošenje odluke. U praksi bi promena režima rada određenih tačkama kraka A-B mogla da bude dostupna operateru tokom operativnog rada, omogućujući mu prilagođavanje zahtevima aktuelnog zadatka, slično kao u slučaju M15 i M17.

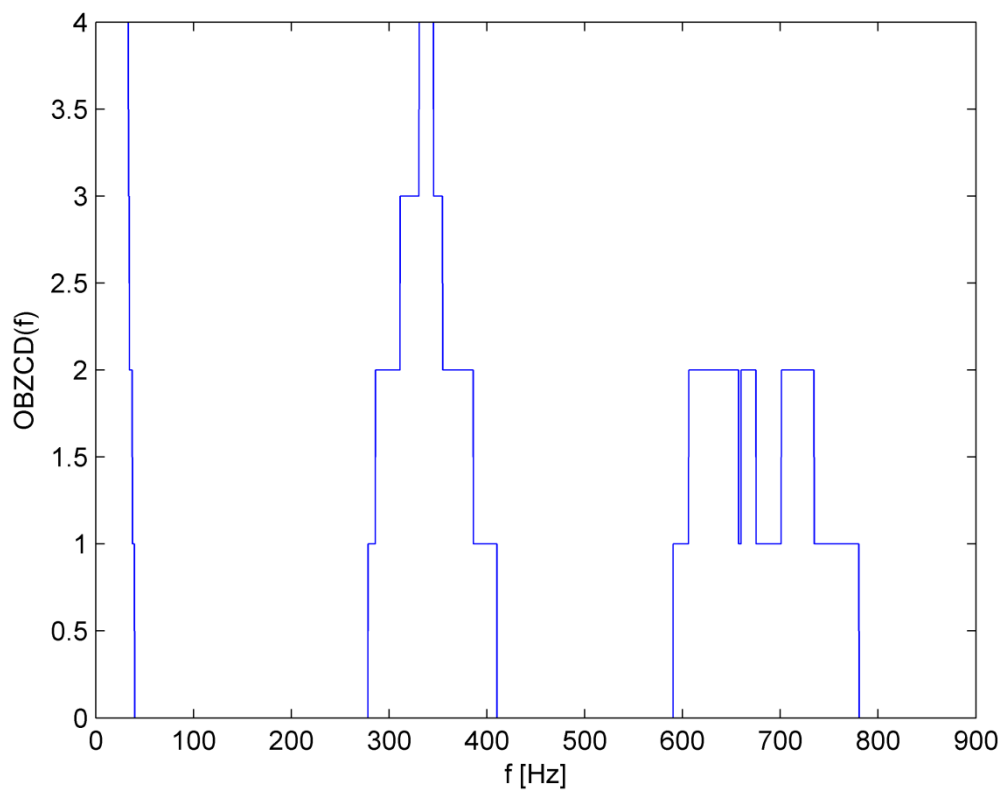
U Tab. 11 navedene su vrednosti parametara koji definišu MPCIPB (skup PRI/PRF, trajanja impulsa) i druge interesantne vrednosti, za dva moguća režima rada koji odgovaraju tačkama A i B na Sl. 25. Sa stanovišta M19, vrednost trajanja kratkog impulsa se može izabrati proizvoljno iz navedenog intervala, u skladu sa potrebama praktične implementacije. Na Sl. 30, Sl. 31, Sl. 32 i Sl. 33 prikazani su rasporedi slepih zona za sve PRF i rasporedi broja preklopljenih slepih zona u tačkama A i B. Poređenjem rasporeda slepih zona i rasporeda broja preklopljenih slepih zona M19 i M17, vidi se da je previše optimistična procena širine osnovne slepe zone u M17 uzrok previše optimističnih vrednosti DVP u M17 u odnosu na M19.

Tab. 11 – Parametri MPCIPB za dva moguća režima rada.

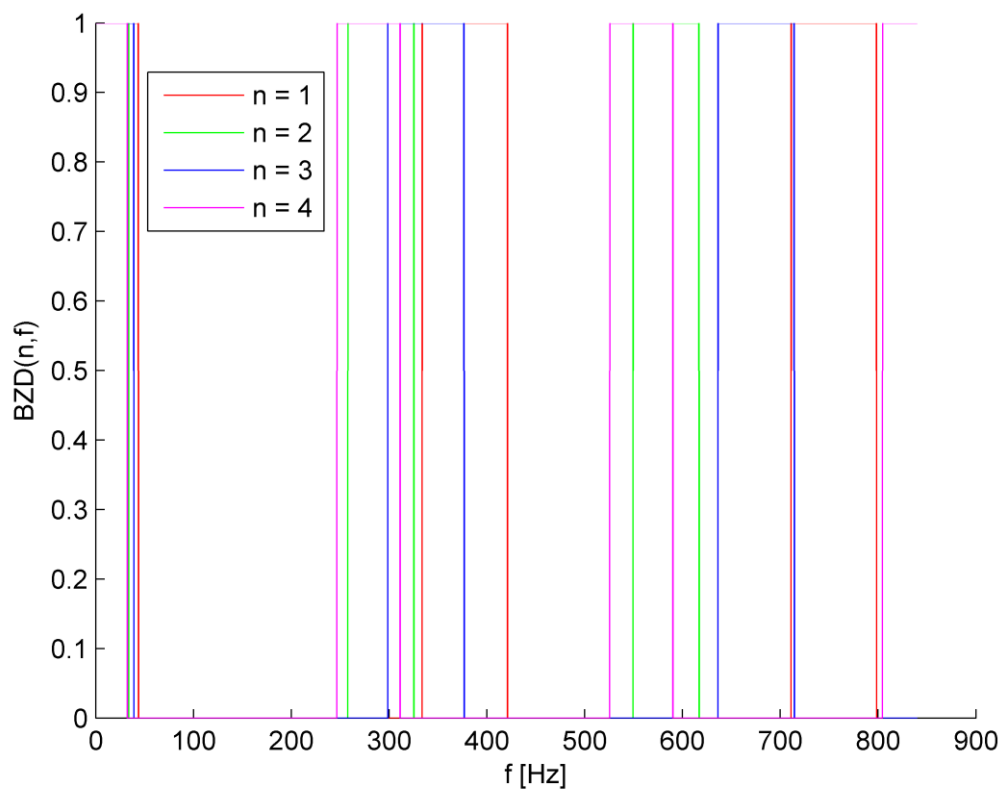
<i>Tačka u PF</i>	A (12.81, 71.82 %, -22.05 m/s)	B (11.01, 77.08 %, -24.29 m/s)
<i>Tačka u POS</i>	A (35, 270 μ s, 2.7 ms)	B (20, 250 μ s, 2.65 ms)
PRI_n [ms]	{2.7, 3.12, 2.87, 3.2}	{2.65, 3.43, 2.96, 3.59}
PRF_n [Hz]	{370.4, 320.3, 348.6, 311.9}	{377.4, 291.6, 337.6, 278.9}
τ_S [μ s]	[0.43, 10]	[0.29, 10]
τ_L [μ s]	270	250
F_B [Hz]	11851.85	6415.09
r_n	{32, 37, 34, 38}	{17, 22, 19, 23}
n_p	14	13
σ_{f_s} [Hz]	1.59	1.61
σ_f [Hz]	1.62	1.64
$n_f(n)$	{3, 3, 3, 3}	{3, 3, 3, 3}
$\Delta v_b(n)$ [Hz]	{79.37, 68.64, 74.7, 66.83}	{87.08, 67.29, 77.92, 64.37}



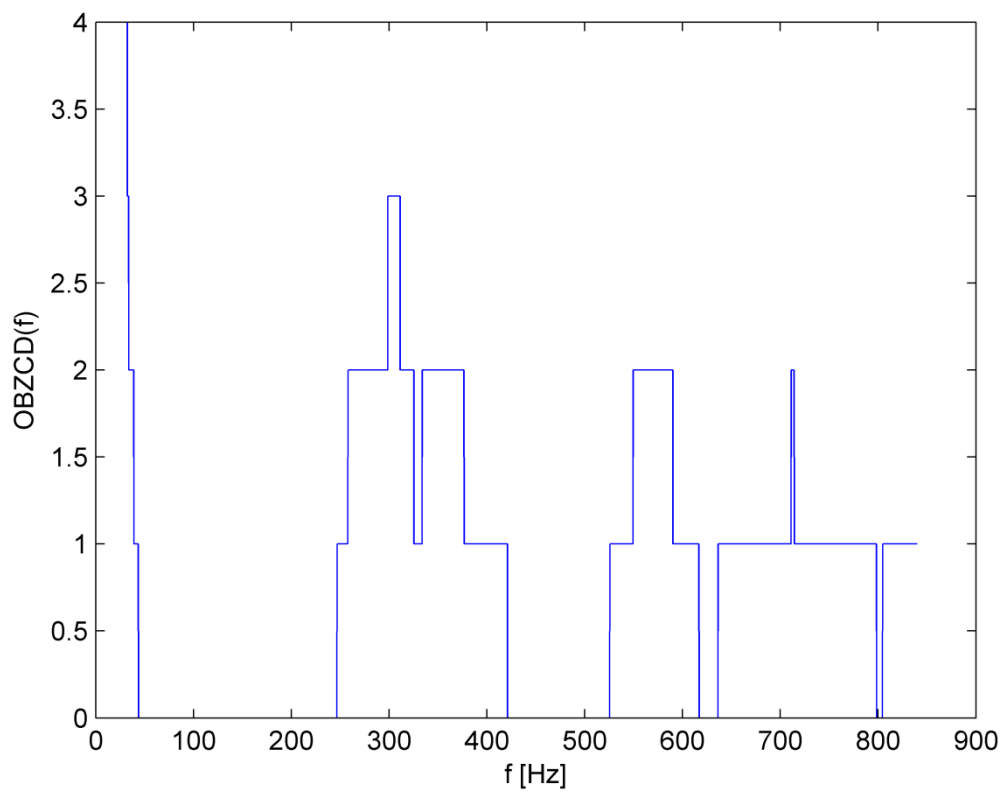
Sl. 30 – Raspored slepih zona za sve PRF u tački A PF.



Sl. 31 – Raspored broja preklapljenih slepih zona u tački A PF.



Sl. 32 – Raspored slepih zona za sve PRF u tački B PF.



Sl. 33 – Raspored broja preklopljenih slepih zona u tački B PF.

Naravno, moglo bi da se postavi pitanje da li je metoda za određivanje širine osnovne slepe zone u M19 možda pesimistična, ili je čak i ona optimistična? Pomenuta metoda je nastala prilagođavanjem aproksimativne metode za određivanje broja Dopler filtera zaslepljenih klaterom, koju je predložio Rihaczek u članku [13], u najeminentnijem časopisu u oblasti radarske tehnike, prema saznanjima kandidata. Rihaczek-ov članak [13] je objavljen još 1973. godine i od tada nije osporen. Zbog toga je u ovoj studiji Rihaczek-ov stav o modelovanju zaslepljenosti Dopler filtera usvojen kao aksioma. Provera objektivnosti Rihaczek-ove metode mogla bi eventualno biti predmet neke zasebne studije.

U poređenju sa M15 i M17, matematički model M19 je kompletniji i bolje teorijski zasnovan, pa će se evaluacija performansi, provera polaznih hipoteza i diskusija sprovoditi na osnovu tog modela.

4 Efikasan algoritam za aproksimativno rešavanje problema izbora impulsne povorke zasnovan na višeciljnom evolutivnom algoritmu

U prethodnom poglavlju pokazano je da je u višeciljnom optimizacionom problemu izbora MPCIPB dopustivi prostor odlučivanja diskretan. Na osnovu finalne verzije matematičkog modela optimizacionog problema, označene sa M19 i predstavljene u trećem poglavlju, utvrđeno je da je sa praktične tačke gledišta najznačajniji konflikt između prve dve funkcije cilja, SNR_L (koja određuje maksimalnu daljinu otkrivanja) i DVP (koja određuje Doplerovu vidljivost). Takođe je utvrđeno da sve tri funkcije cilja zavise od promenljive odlučivanja r^* , ali da se r^* u izrazima za sve funkcije cilja uvek pojavljuje u okviru količnika dva polinoma prvog reda. Pomenuti količnici asimptotski teže jedinici kako r^* raste, što znači da se funkcije cilja sve sporije menjaju sa rastom r^* . Sa druge strane, r^* je jedina promenljiva odlučivanja koja samim matematičkim modelom nije ograničena sa gornje strane. Neograničenim povećavanjem r^* , broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja neograničeno raste, dok se nova PO rešenja značajna u kontekstu konflikta SNR_L i DVP sve sporije pronalaze. Zato je odlučeno da se za potrebe praktične primene M19 uvede gornji limit r_{UL}^* za promenljivu r^* . Sve što je prethodno navedeno važi i za prethodne, jednostavnije verzije matematičkog modela, M15 i M17.

Uvođenje limita za r^* dovodi do toga da je broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja konačan, tako da se POS za predmetni problem može odrediti egzaktno, metodom iscrpne pretrage. Međutim, iscrpna pretraga u ovom slučaju podrazumeva broj operacija poređenja vrednosti funkcija cilja koji je proporcionalan kvadratu broja tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja. U konkretnim primerima korišćenim u poglavlju 3, radi se o bilionima operacija poređenja. Kvadratna zavisnost ukazuje i na lošu skalabilnost. Ako bi se na primer korak diskretizacije trajanja dugog impulsa τ_{STEP} prepolovio, trajanje iscrpne pretrage bi se učetvorostručilo.

Tema ovog poglavlja je algoritam za aproksimativno određivanje POS za predmetni problem, koji je brži i skalabilniji od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje POS, a istovremeno i dovoljno tačan, u smislu što manjih razlika između aproksimativnog i egzaktnog POS. U nastavku će hronološki biti predstavljen razvojno-istraživački proces kojim se došlo do finalne verzije algoritma za aproksimativno određivanje POS, čije će performanse nakon toga biti ispitane. Na kraju poglavlja diskutovaće se o izboru parametara predloženog algoritma, kao i o mogućim uzrocima određenih problema na koje se naišlo tokom istraživanja i razvoja u vezi istog.

Važno je napomenuti da su se istraživanje i razvoj opisani u ovom poglavlju hronološki odvijali pre nastanka matematičkog modela M19, tj. sprovedeni su na modelu M17. Zbog toga će se

celo ovo poglavlje oslanjati na M17, a performanse predloženog algoritma na modelu M19 biće ispitane u petom poglavlju.

4.1 Inicijalni algoritam

Kao što je već rečeno u drugom poglavlju, NSGA-II [32] je popularan, dobro testiran i efikasan višeciljni evolutivni algoritam, koji je primenjivan u mnogim vrstama problema iz stvarnog sveta, uključujući i probleme u oblasti radarskog inženjerstva. Kao inicijalni algoritam za aproksimativno rešavanje višeciljnog optimizacionog problema izbora MPCIPB, izabran je NSGA-II sa implementacijom koja je prilagođena predmetnom problemu. U nastavku će najpre biti ukratko opisan NSGA-II, zatim specifičnosti implementacije NSGA-II u odnosu na predmetni problem, a na kraju i softverski sistem kojim se rešava problem.

4.1.1 Kratak opis NSGA-II

NSGA-II [32] je MOEA koji omogućuje da se jednim izvršenjem pronađe skup rešenja koji aproksimira POS. Algoritamska složenost NSGA-II je $O(MN_P^2N_G)$, gde je M broj ciljeva, N_P veličina populacije, a N_G broj generacija. Algoritam vodi računa o tome da tačke PF budu raspoređene što ravnomernije a omogućava i rešavanje problema sa ograničenjima.

Ono što je karakteristično za NSGA-II je da se selekcija zasniva na sortiranju prema nedominiranosti (eng. non-dominated sorting) gde se svako rešenje svrstava u jedan od nedominiranih frontova i rangira shodno tome. Nedominirana rešenja iz cele populacije svrstavaju se u prvi nedominirani front i dodeljuje im se rang 1. Zatim se ova rešenja uklanjaju i postupak se ponavlja sa preostalim rešenjima da bi se dobio drugi nedominirani front (ranga 2), itd. Pomenuti rang se koristi kao mera prilagođenosti jedinke u procesu selekcije.

Da bi se omogućila optimizacija u prisustvu proizvoljnih ograničenja, koncept dominacije se proširuje konceptom *constrained-dominate*, opisanim na str. 192 u [32], koji definiše poređenje između dva nedopustiva (eng. infeasible) rešenja, te između dopustivog i nedopustivog rešenja.

Da bi se očuvao diverzitet rešenja, u pojedinim koracima algoritma, za poređenje rešenja koristi se *crowded-comparison* operator, opisan na str. 185 u [32], koji definiše poređenje između dva rešenja koja imaju isti rang nedominiranosti tako da je bolje rešenje ono oko kojeg je manja gustina drugih rešenja.

Obrada jedne generacije u NSGA-II izgleda ovako: od populacije P_t veličine N_P dobija se populacija naslednika Q_t veličine N_P primenom binarne turnirske selekcije (pri čemu se za poređenje koristi *crowded-comparison* operator), a zatim uobičajenog ukrštanja i mutacije. Unija ove dve populacije R_t veličine $2N_P$ sortira se na osnovu nedominiranosti u frontove F_1, F_2, \dots

Naredna populacija P_{t+1} se formira od N_P rešenja iz prvih l frontova, pri čemu se uzimaju sva rešenja iz frontova F_1, F_2, \dots, F_{l-1} i najbolja rešenja iz fronta F_l , koji je prethodno sortiran pomoću *crowded-comparison* operatora.

4.1.2 Specifičnosti implementacije NSGA-II u problemu izbora impulsne povorke

Implementacija evolutivnog, tj. genetskog algoritma zahteva da se donesu određene odluke specifične za problem koji se rešava. Između ostalog, potrebno je odabrati način reprezentacije rešenja, genetske operatore koji će biti korišćeni, te vrednosti različitih parametara algoritma.

U [32] navedeni su primeri upotrebe NSGA-II sa binarnom reprezentacijom rešenja i sa realnom reprezentacijom rešenja. Sve tri promenljive odlučivanja u optimizacionom problemu izbora MPCIPB uzimaju vrednosti iz diskretnih skupova. Promenljive τ_L i PRI_{\min} mogu imati samo pozitivne vrednosti, preciznije, prirodne umnoške pozitivnih realnih koraka diskretizacije τ_{STEP} i PRI_{STEP} , repektivno, a sa gornje strane su ograničene putem funkcija ograničenja $g_2(\mathbf{x})$ i $g_5(\mathbf{x})$ u (39), respektivno. Promenljiva r^* je prirodan broj, a kao što je ranije rečeno, za potrebe rešavanja optimizacionog problema sa gornje strane je ograničena uslovom $r^* \leq r_{UL}^*$. Pošto sve tri promenljive uzimaju ekvidistantne vrednosti iz konačnih skupova, odlučeno je da se sve tri promenljive predstavje binarno, tj. niskama bitova.

Broj bitova potreban za predstavljanje određene promenljive zavisi od parametara matematičkog modela i usvojene vrednosti r_{UL}^* , što se može ilustrovati primerom. Pretpostavimo da su vrednosti parametara kao u Tab. 6 i da je usvojeno $r_{UL}^* = 35$. Pošto je maksimalna vrednost promenljive $r^* = 35$, za njenu reprezentaciju potrebno je 6 bita. Promenljive τ_L i PRI_{\min} mogu se predstaviti u binarnom obliku tako da najmanje značajan bit (eng. least significant bit (LSB)) ima vrednost jednaku koraku diskretizacije, u konkretnom slučaju $10 \mu s$ za obe pomenute promenljive. Promenljiva τ_L mora biti pozitivna, tako da je donja granica $10 \mu s$, tj. jedan korak diskretizacije, a gornja granica je određena funkcijom ograničenja $g_2(\mathbf{x})$ u (39). U konkretnom primeru gornja granica za τ_L je $500 \mu s$, tj. 50 koraka diskretizacije, iz čega sledi da je za predstavljanje ove promenljive potrebno takođe 6 bita. Donja i gornja granica za promenljivu PRI_{\min} određene su funkcijama ograničenja $g_3(\mathbf{x})$ i $g_5(\mathbf{x})$, respektivno. U konkretnom primeru gornja granica za PRI_{\min} je $19.04 ms$, tj. 1904 koraka diskretizacije, pa je za predstavljanje ove promenljive potrebno 11 bita. Ukupna dužina hromozoma je 23 bita.

U [32], za algoritam sa binarnom reprezentacijom korišćeno je jednopoziciono ukrštanje i bitska mutacija. Isti pristup usvojen je i u ovoj studiji.

Za varijantu implementacije NSGA-II koja je prethodno opisana, parametri čije vrednosti treba odabrati su: veličina populacije, broj generacija, verovatnoća ukrštanja i verovatnoća bitske mutacije.

Veličina populacije, N_P , predstavlja broj jedinki, tj. rešenja, u jednoj generaciji. U [32] je za testiranje NSGA-II na problemu sa ograničenjima korišćena vrednost $N_P = 100$. U ovoj studiji su, kao što će kasnije biti opisano, isprobane različite vrednosti N_P , uključujući i vrednost 100.

U nekim studijama, kao što je [45], genetski algoritam se zaustavlja kada se utvrdi da nove generacije više ne doprinose značajno poboljšanju rešenja. No, na osnovu proučene literature o NSGA-II [32], [35], [36] i [46], može se zaključiti da se kao kriterijum za zaustavljanje NSGA-II praktično isključivo koristi dostignut zadati broj generacija, N_G . Takav pristup usvojen je i u ovoj studiji, a isprobane su različite vrednosti N_G .

Verovatnoća ukrštanja, p_c , određuje koji deo populacije naslednika prolazi kroz proces jednopozicionog ukrštanja, a koji deo ostaje nepromenjen. U [32] je u svim testovima korišćena vrednost $p_c = 0.9$. U ovoj studiji isprobane su različite vrednosti za p_c , uključujući i 0.9.

Verovatnoća mutacije, p_m , određuje za svaki bit u hromozomu ponaosob da li će taj bit biti invertovan. U [32] je za p_m korišćena recipročna vrednost dužine hromozoma. U ovoj studiji isprobane su različite vrednosti za p_m , uključujući i vrednost preporučenu u [32].

4.1.3 Kratak opis arhitekture i realizacije softverskog sistema

Softverski sistem pomoću kojeg se rešava problem u ovoj studiji, koncipiran je kao hibridni sistem koji se sastoji od nekoliko MATLAB skriptova (.m fajlova) i jedne konzolne aplikacije. Softver je nazvan POPDWD, što je akronim od eng. *Pareto optimal pulse Doppler waveform design*. Sam NSGA-II implementiran je u konzolnoj aplikaciji „POPDWD.exe“, koja je napisana u jeziku C, čime se postiže brzo izvršavanje algoritma. Skript „POPDWD_NSQA2_prep_opt.m“ vrši pripremu fajlova sa ulaznim podacima za aplikaciju „POPDWD.exe“, poziva samu aplikaciju, te kopira ulazne fajlove i izlazne fajlove sa rezultatima u odgovarajuće foldere, tako da je svako izvršenje NSGA-II potpuno dokumentovano. Skript „POPDWD_NSQA2_an_plot.m“, zajedno sa još nekoliko pratećih skriptova, sprovodi analizu, postprocesiranje (što će biti objašnjeno kasnije) i prikaz rezultata izvršavanja optimizacionog algoritma.

Aplikacija „POPDWD.exe“ zasnovana je na implementaciji NSGA-II otvorenog koda koja je dostupna na *web* stranici *Kanpur Genetic Algorithms Laboratory* (KanGAL) [47]. Tu implementaciju napisao je autor NSGA-II i nekadašnji upravnik KanGAL-a, profesor Kalyanmoy Deb sa svojim studentima. Primenom te proverene softverske implementacije, skraćeno je vreme potrebno za sprovođenje ove studije uz značajno smanjenje rizika dobijanja pogrešnih rezultata

usled potencijalne greške u implementaciji NSGA-II. KanGAL implementacija NSGA-II sastoji se od nekoliko modula. Da bi se NSGA-II primenio na konkretan problem, potrebno je izmeniti samo jedan od modula u delu u kojem se definišu funkcije cilja i funkcije ograničenja, pri čemu se podrazumeva da su ograničenja data u obliku kao u (39). Zatim je potrebno rekompajlirati aplikaciju i pokrenuti je sa odgovarajućim ulaznim fajlom u kojem su definisani parametri algoritma.

Međutim, KanGAL implementaciju je na prethodno opisan način moguće primeniti samo u slučaju kada se funkcije cilja i ograničenja mogu izraziti analitički, sa konstantnim vrednostima parametara koji figurišu u samim funkcijama. Zbog toga KanGAL implementacija nije direktno primenljiva na problem koji se proučava u ovoj studiji, jer jednu od funkcija cilja nije moguće izraziti analitički. Pored toga, za buduća istraživanja i eventualnu praktičnu primenu optimizacionog algoritma bilo bi od interesa da se parametri problema mogu menjati bez potrebe za rekompajliranjem aplikacije, što nije obezbeđeno u KanGAL implementaciji. Zbog svega navedenog, KanGAL implementacija je proširena sa nekoliko modula. Jedan od dodatnih modula zadužen je za numeričku evaluaciju problematične funkcije cilja *DVP*. Imajući u vidu da u okviru evaluacije *DVP* postoji potreba za numeričkom integracijom, prilikom računanja *CA*, napisan je dodatni modul koji vrši integraciju primenom trapezoidnog pravila. Dodat je i modul za učitavanje parametara problema iz istog ulaznog fajla iz kojeg se čitaju i parametri NSGA-II.

POPDWD funkcioniše na način koji je opisan u produžetku. U skriptu „POPDWD_NSGA2_prep_opt.m“ potrebno je zadati parametre problema, parametre NSGA-II i broj izvršenja NSGA-II, N_R . Kada se pokrene ovaj skript, on za svako od N_R izvršenja generiše ulazni fajl za aplikaciju „POPDWD.exe“ (fajl se od izvršenja do izvršenja razlikuje samo u vrednosti kojom se inicijalizuje generator slučajnih brojeva), poziva aplikaciju „POPDWD.exe“ i, nakon njenog izvršenja, kopira sve relevantne fajlove u odgovarajući folder, tako da za svako izvršenje postoji odvojen folder. Nakon završetka izvršavanja skripta „POPDWD_NSGA2_prep_opt.m“, potrebno je u skriptu „POPDWD_NSGA2_an_plot.m“ zadati folder u kojem se nalaze fajlovi koji se žele analizirati. O procedurama koje sprovodi skript „POPDWD_NSGA2_an_plot.m“ biće više reči u narednim odeljcima.

4.2 Ispitivanje inicijalnog algoritma

Optimizacioni algoritam opisan u prethodnom odeljku ispitan je na matematičkom modelu M17, sa vrednostima parametara kao u Tab. 6 i $r_{UL}^* = 35$. Inicijalno su odabrani sledeći parametri NSGA-II: $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90$ % i $p_m = 4.3478$ %. Ovakav izbor parametara bio je uglavnom inspirisan podešavanjima korišćenim u [32]. Rezultati izvršavanja algoritma poređeni su

sa egzaktnim PF koji je u odeljku 3.2.2 dobijen iscrpnom pretragom i prikazan na Sl. 13. Nakon nekoliko izvršavanja ovako podešenog algoritma, uočeno je da se pojedinačnim izvršavanjem dobija loša aproksimacija PF, da rezultati značajno variraju od izvršavanja do izvršavanja, te da je broj različitih rešenja (eng. different solutions) na kraju izvršavanja značajno manji od veličine populacije, tj. da postoji veliki broj preklopljenih rešenja (eng. overlapped solutions). Radi ilustracije prethodno iznetih opservacija, na Sl. 34 i Sl. 35 prikazani su rezultati dva izvršavanja algoritma sa istim podešavanjima.

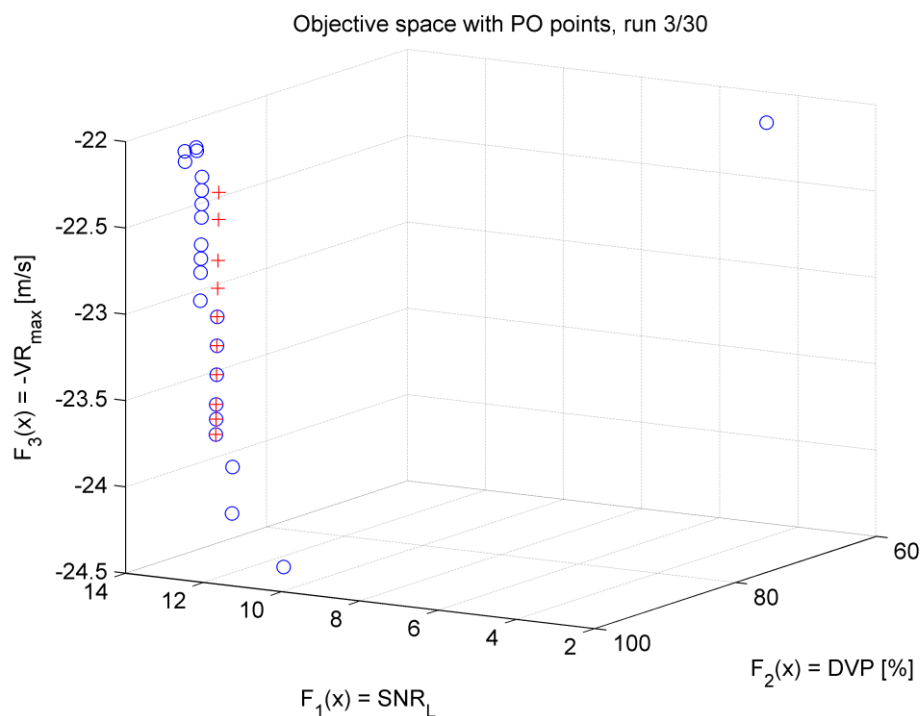
Nakon loših rezultata sa inicijalnim vrednostima parametara, odlučeno je da se isprobaju druge vrednosti parametara, tj. da se ispita kako menjanje svakog od 4 parametra utiče na kvalitet dobijenih rezultata. Zbog uočene varijabilnosti rezultata, odlučeno je da se za svaki skup vrednosti parametara izvršavanje algoritma ponovi $N_R = 30$ puta, da bi se različiti skupovi parametara mogli uporediti statistički. Kao karakteristike performansi za poređenje skupova parametara, odabrane su srednja vrednost (eng. sample mean) broja različitih rešenja, μ_D i srednja vrednost broja tačnih rešenja (koja postoje u egzaktnom POS), μ_C .

Najpre je varirana veličina populacije, N_P , dok su za ostale parametre zadržane inicijalne vrednosti: $N_G = 100$, $p_c = 90\%$ i $p_m = 4.3478\%$. Rezultati su prikazani u Tab. 12. Vidi se da brojevi različitih i tačnih rešenja monotonno rastu sa porastom veličine populacije. Povećavanjem veličine populacije može se značajno povećati broj tačnih rešenja.

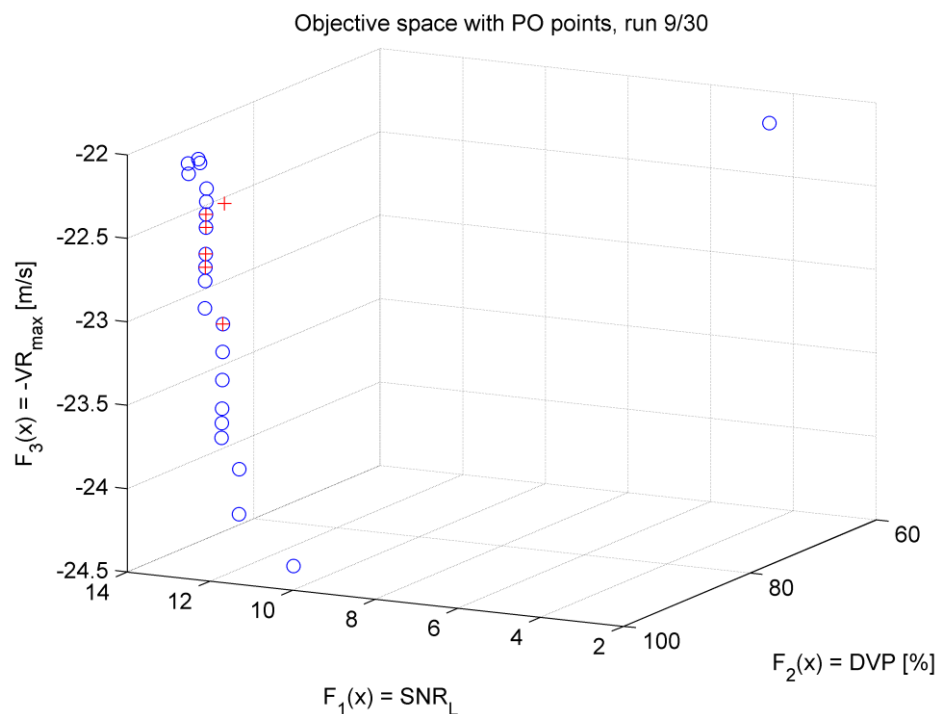
Tab. 12 – Uticaj veličine populacije, N_P , na broj različitih i tačnih rešenja, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

Velicina populacije, N_P	Srednja vrednost broja različitih rešenja, μ_D	Srednja vrednost broja tačnih rešenja, μ_C
50	4.3	0.46667
100	6.5	3.1667
200	10.8667	6.2333
400	13.1667	9.6333
800	15.7667	13.6667
1600	16.3333	14.6333

Zatim je variran broj generacija, N_G , dok su za ostale parametre zadržane inicijalne vrednosti: $N_P = 100$, $p_c = 90\%$ i $p_m = 4.3478\%$. Rezultati su prikazani u Tab. 13. Broj različitih rešenja opada sa porastom broja generacija, dok za broj tačnih rešenja deluje kao da u početku raste, a kasnije opada sa porastom broja generacija. Stiče se utisak da se variranjem broja generacija u odnosu na inicijalnu vrednost ne može postići poboljšanje u smislu broja tačnih rešenja.



Sl. 34 – Rezultati jednog izvršavanja NSGA-II sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, egzaktan PF (plavi krugovi) i aproksimacija PF koja je rezultat NSGA-II (crveni krstići).
 Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 [40].



Sl. 35 – Rezultati drugog izvršavanja NSGA-II sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, stvarni PF (plavi krugovi) i aproksimacija PF koja je rezultat NSGA-II (crveni krstići).
 Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 [40].

Tab. 13 – Uticaj broja generacija, N_G , na broj različitih i tačnih rešenja, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

Broj generacija, N_G	Srednja vrednost broja različitih rešenja, μ_D	Srednja vrednost broja tačnih rešenja, μ_C
25	15.9333	1
50	10.1667	2.0333
100	6.5	3.1667
200	4.8	2.9
400	4.0667	2.4667

Variranjem verovatnoće ukrštanja, p_c , uz zadržavanje ostalih parametara na inicijalnim vrednostima, $N_P = 100$, $N_G = 100$ i $p_m = 4.3478\%$, dobijeni u rezultati prikazani u Tab. 14. Ne uočava se zakonitost u promeni broja različitih i tačnih rešenja sa porastom verovatnoće ukrštanja. Opšti utisak je da verovatnoća ukrštanja nema značajan uticaj na broj tačnih rešenja.

Tab. 14 – Uticaj verovatnoće ukrštanja, p_c , na broj različitih i tačnih rešenja, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_m = 4.3478\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

Verovatnoća ukrštanja, p_c [%]	Srednja vrednost broja različitih rešenja, μ_D	Srednja vrednost broja tačnih rešenja, μ_C
50	7.1333	2.4333
60	6.4667	2.0333
70	7.1667	3.1667
80	6.9	2.4667
90	6.5	3.1667
100	6.1333	1.8

Na kraju je varirana verovatnoća mutacije, p_m , dok su ostali parametri zadržani na inicijalnim vrednostima, $N_P = 100$, $N_G = 100$ i $p_c = 90\%$. Rezultati su prikazani u Tab. 15. Broj različitih rešenja monotono raste sa porastom verovatnoće mutacije, dok za broj tačnih rešenja deluje da najpre raste, a kasnije opada sa porastom verovatnoće mutacije.

Tab. 15 – Uticaj verovatnoće mutacije, p_m , na broj različitih i tačnih rešenja, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

Verovatnoća mutacije, p_m [%]	Srednja vrednost broja različitih rešenja, μ_D	Srednja vrednost broja tačnih rešenja, μ_C
0.54348	4.8333	0.86667
1.087	5.4	1.1667
2.1739	5.5333	1.3667
4.3478	6.5	3.1667
8.6957	13.1667	4
17.3913	28.4	1.0667

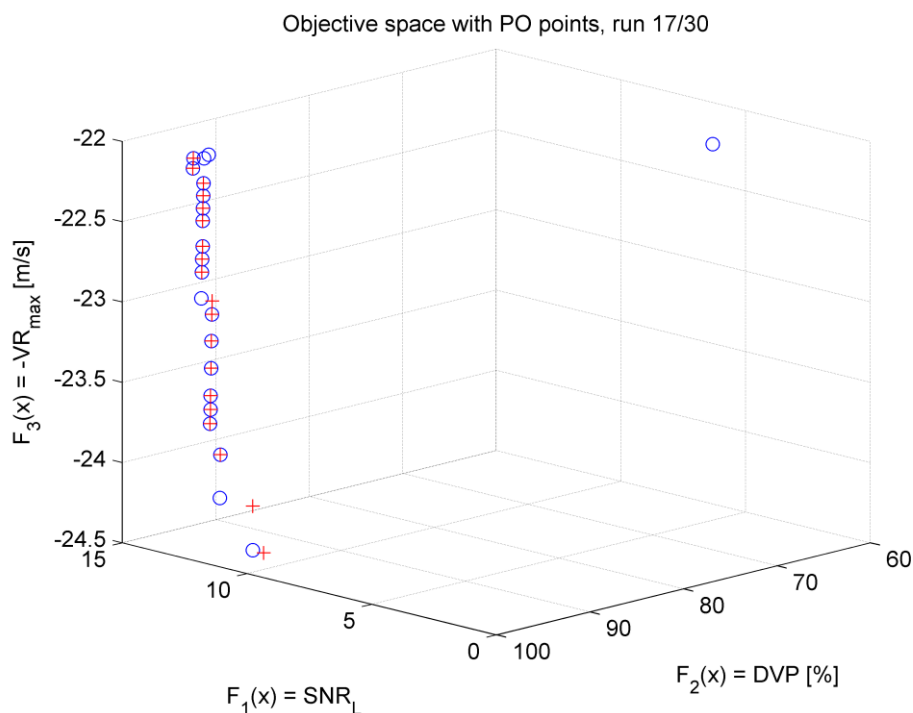
Na osnovu prethodno prikazane eksploracije prostora parametara NSGA-II, može se zaključiti da u odnosu na inicijalne vrednosti parametara, povećavanje veličine populacije i (u manjoj meri) verovatnoće mutacije doprinosi poboljšanju kvaliteta dobijene aproksimacije PF, dok variranje broja generacija i i verovatnoće ukrštanja ne doprinosi poboljšanju kvaliteta dobijene aproksimacije PF. Najbolji rezultati postignuti su sa skupom parametara $N_P = 1600$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, ali ni ovi rezultati nisu dovoljno dobri. Na Sl. 36 prikazani su rezultati najboljeg izvršavanja NSGA-II sa prethodno navedenim skupom parametara (ujedno i najboljeg izvršavanja od svih izvršavanja sa svim skupovima parametara). Može se videti da je identifikovano 19 različitih rešenja od kojih je 16 tačno, dok je stvaran broj PO rešenja 22. Ovakva aproksimacija PF sama po sebi nije dovoljno dobra, ali da stvari budu gore, čak i sa pomenutim skupom parametara, postoji varijabilnost u rezultatima od izvršavanja do izvršavanja, tj. broj tačnih rezultata kao na Sl. 36 ne može se dobiti u svakom izvršavanju. U konkretnom slučaju, na uzorku od 30 izvršavanja, broj tačnih rešenja varirao je od 12 do 16.

Za sve skupove parametara uočen je veliki broj preklapljenih rešenja, tj. mali broj različitih rešenja. Ova pojava je bila očekivana, jer je ukupan broj stvarnih PO rešenja 22, pa je neminovno da u populaciji koja je veća od toga, neka rešenja budu preklapljena. Međutim, iz prethodno prikazanih rezultata vidi se da je broj različitih rešenja u proseku manji od 22 (osim za skup parametara $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 17.3913\%$), a u mnogim slučajevima i znatno manji od 22, što nije bilo očekivano. Pored toga, za najbolji skup parametara (kao na Sl. 36) srednja vrednost broja različitih rešenja je oko 1% od veličine populacije, što znači da je mnogo procesorskog vremena izgubljeno na pronalaženje već poznatih rešenja.

Primećeno je postojanje nedominiranih tačaka u aproksimaciji PF koje od stvarnih PO tačaka odstupaju samo po funkciji cilja SNR_L . Tri tačke aproksimiranog PF na Sl. 36 koje nisu tačne, imaju zapravo iste vrednosti kriterijuma DVP i $-VR_{max}$ kao odgovarajuće stvarne PO tačke, a odstupaju po SNR_L . U dopustivom prostoru odlučivanja situacija je slična, postoji potpuno poklapanje po r^* i PRI_{min} , a odstupanje po τ_L .

4.3 Modifikacije algoritma

Karakteristični problemi koji su uočeni tokom testiranja opisanog u prethodnom odeljku inspirisali su dve jednostavne modifikacije optimizacionog algoritma kojima bi se ovi problemi mogli ublažiti, a ukupni rezultati optimizacije poboljšati. Modifikacije se ne odnose na sam NSGA-II već predstavljaju dva koraka postprocesiranja koji se sprovode nad rezultatima koje je proizveo NSGA-II.



Sl. 36 – Rezultati jednog izvršavanja NSGA-II sa parametrima $N_P = 1600$, $N_G = 100$, $p_c = 90$ %, $p_m = 4.3478$ %, stvarni PF (plavi krugovi) i aproksimacija PF koja je rezultat NSGA-II (crveni krstići).
 Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 [40].

Prva modifikacija odnosi se na problem rešenja koja od stvarnih PO rešenja odstupaju samo po SNR_L u dopustivom prostoru ciljeva, tj. samo po promenljivoj τ_L u dopustivom prostoru odlučivanja. Postupak postprocesiranja je domenski specifičan i moguć je zahvaljujući činjenici da od svih funkcija cilja, samo SNR_L zavisi od promenljive τ_L . Postprocesiranje podrazumeva da se za svako rešenje koje je proizveo NSGA-II pokuša sledeća korekcija: promenljiva τ_L datog rešenja uveća se koliko god je moguće, a da se ne prekrše ograničenja definisana funkcijama $g_2(\mathbf{x})$, $g_3(\mathbf{x})$ i $g_4(\mathbf{x})$ u (39), a zatim vrednost SNR_L koriguje prema novoj vrednosti τ_L . Nakon što su sva rešenja obrađena na prethodno opisan način, moguće je da neka od rešenja više nisu nedominirana, pa je potrebno sprovesti iscrpnu pretragu za nedominiranim rešenjima među korigovanim rešenjima. Sa obzirom na to da su eksperimenti opisani u prethodnom odeljku pokazali da je broj nedominiranih rešenja koja proizvodi NSGA-II relativno mali, iscrpna pretraga za nedominiranim rešenjima nakon korekcije τ_L ima zanemarljivu računsku zahtevnost u odnosu na izvršavanje samog NSGA-II.

Druga modifikacija odnosi se na varijabilnost rezultata optimizacije. Varijabilnost i niska ponovljivost rezultata su načelno neželjene karakteristike. Sa druge strane, prethodni eksperimenti pokazali su da je malo verovatno da se pojedinačnim izvršenjem NSGA-II dobije dobra aproksimacija PF. Takođe je uočeno, kao što se može videti na Sl. 34 i Sl. 35, da se u različitim izvršavanjima sa istim parametrima mogu dobiti dobre aproksimacije različitih delova PF. U tom

svetlu, varijabilnost bi se mogla iskoristiti na pozitivan način, tako što bi se rezultati više uzastopnih izvršavanja NSGA-II kombinovali, i upravo to je srž druge modifikacije. Postupak postprocesiranja podrazumeva da se najpre formira unija nedominiranih rešenja iz N_R izvršavanja NSGA-II uz odbacivanje preklopljenih rešenja, a da se zatim nad ovako dobijenim skupom rešenja (čija kardinalnost je i dalje relativno mala) sprovede iscrpna pretraga za nedominiranim rešenjima. Skup nedominiranih rešenja dobijen na prethodno opisan način, u daljem tekstu zvaćemo kompozitnom aproksimacijom POS (KAPOS), a njegovu projekciju na dopustivi prostor ciljeva kompozitnom aproksimacijom PF (KAPF).

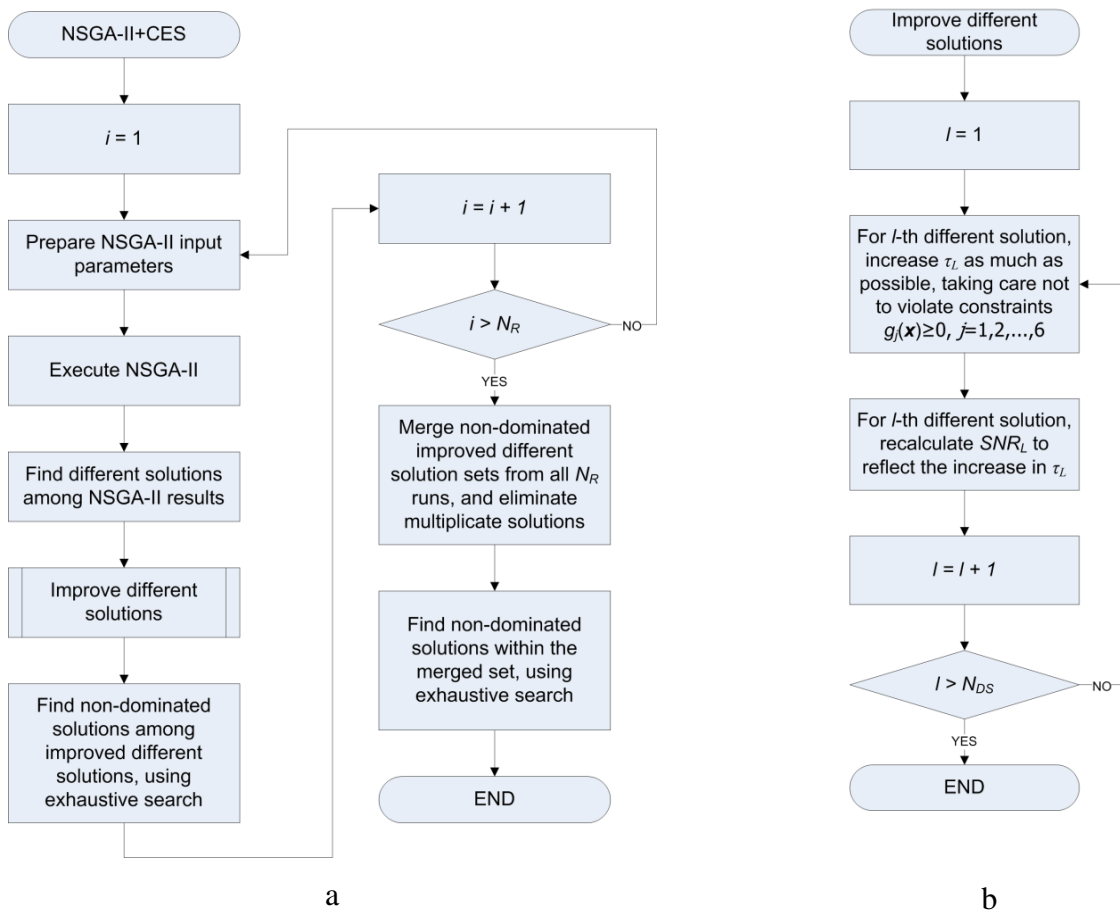
Optimizacioni algoritam koji se zasniva na višestrukome ponavljanju izvršavanja NSGA-II i primeni prethodno opisanih postupaka postprocesiranja nazvan je *NSGA-II with Combining of solution sets using Exhaustive Search* (NSGA-II+CES). Dijagram toka NSGA-II+CES prikazan je na Sl. 37 a), dok je dijagram toka domenski specifične procedure koja ublažava divergenciju rešenja po pitanju τ_L prikazan na Sl. 37 b).

NSGA-II+CES ima pet parametara, četiri koja se odnose na NSGA-II – N_P , N_G , p_c , p_m i jedan dodatan parametar, broj izvršavanja NSGA-II N_R .

4.4 Ispitivanje NSGA-II+CES

NSGA-II+CES najpre je testiran na podacima koji su prikupljeni u eksperimentima opisanim u odeljku 4.2. Karakteristike performansi koje su korišćene za poređenje različitih skupova parametara su:

- minimalna vrednost broja različitih rešenja, min_D ,
- maksimalna vrednost broja različitih rešenja, max_D ,
- srednja vrednost broja različitih rešenja, μ_D ,
- standardna devijacija broja različitih rešenja, σ_D ,
- minimalna vrednost broja tačnih rešenja, min_C ,
- maksimalna vrednost broja tačnih rešenja, max_C ,
- srednja vrednost broja tačnih rešenja, μ_C ,
- standardna devijacija broja tačnih rešenja, σ_C ,
- ukupan broj rešenja u KAPOS, C_D ,
- broj tačnih rešenja u KAPOS, C_C ,
- aproksimativna vrednost broja operacija (poređenja) potrebnih za određivanje KAPOS, N_C , izračunata kao $N_C = MN_P^2 N_G N_R$.



Sl. 37 – NSGA-II+CES: a) Dijagram toka algoritma, b) Dijagram toka procedure za korigovanje rešenja, gde je N_{DS} ukupan broj različitih rešenja dobijenih obradom rezultata jednog izvršenja NSGA-II. [Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 \[40\].](#)

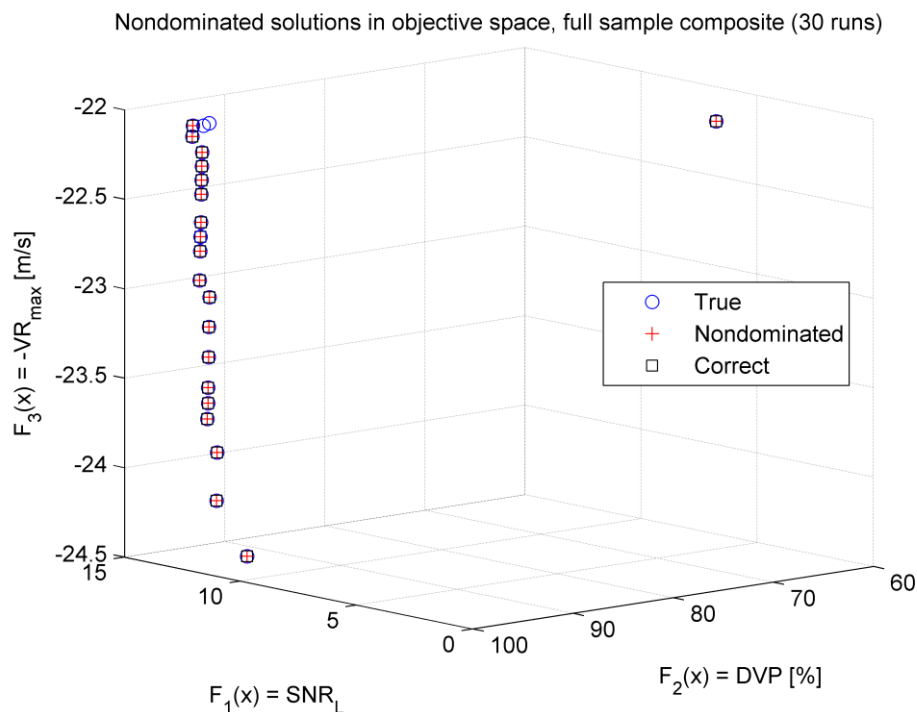
Pre prikaza rezultata dobijenih pomoću NSGA-II+CES, biće razmotreno kakav rezultat optimizacije se može smatrati zadovoljavajućim. U odeljku 3.2.2 analiziran je stvarni PF prikazan na Sl. 13 i uočeno je da krak A-C PF nije relevantan sa praktične tačke gledišta, jer nudi zanemarljivo povećanje $-VR_{max}$ na račun značajnog smanjenja SNR_L i/ili DVP . Sa druge strane, zaključeno je da je krak A-B relevantan u praksi jer je u okviru njega moguće među ciljevima ostvariti trampu, koja je od praktičnog značaja. Prema tome, KAPF koja sadrži sve tačke kraka A-B može se smatrati dobrom aproksimacijom.

U Tab. 16 prikazano je kako promena veličine populacije, N_P , utiče na karakteristike performansi NSGA-II+CES, kada su vrednosti ostalih parametara zadržane na inicijalnim, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$ i $p_m = 4.3478\%$. Kada su u pitanju srednje vrednosti brojeva različitih i tačnih rešenja, uočava se monotoni rast sa porastom N_P , što se slaže sa opservacijama iz Tab. 12. Poređenjem sa rezultatima iz Tab. 12, primećuje se povećanje broja tačnih rešenja i blago smanjenje broja različitih rešenja, što je posledica primene korekcije rešenja. Međutim, tek se formiranjem

KAPOS dobijaju prihvatljivi rezultati. Vidi se da se za $N_P \geq 400$, KAPOS sastoji od 19 ili 20 tačnih rešenja. Na Sl. 38 prikazana je KAPF za slučaj $N_P = 400$, dok je na Sl. 39 prikazana KAPF za slučaj $N_P = 800$ (ista KAPF se dobija i za $N_P = 1600$). U sva tri slučaja KAPF predstavlja dobru aproksimaciju, u odnosu na ranije usvojene kriterijume. Dakle, uz dovoljno veliku populaciju, NSGA-II+CES daje dobre rezultate, a cena koja se plaća je veliki broj operacija.

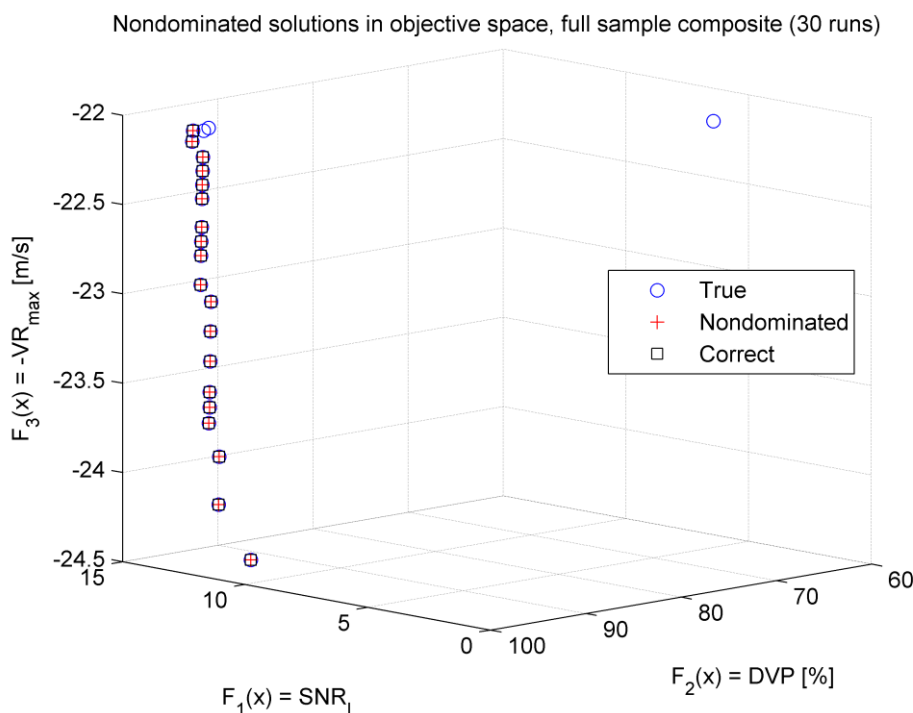
Tab. 16 – NSGA-II+CES, uticaj veličine populacije, N_P , na karakteristike performansi, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

N_P	50	100	200	400	800	1600
min_D	1	2	5	7	10	13
max_D	6	10	16	18	18	19
μ_D	3.8667	6.4333	10.4667	12.9667	15.7333	16.3333
σ_D	1.5025	2.3735	2.7759	2.9535	2.3034	1.4223
min_C	0	0	2	6	10	13
max_C	6	10	16	18	18	19
μ_C	1.4667	5.4667	9.4333	12.5333	15.5667	16.1333
σ_C	1.6965	2.7258	3.2662	3.1154	2.3589	1.383
C_D	27	19	19	20	19	19
C_C	11	17	18	20	19	19
N_C	22500000	90000000	360000000	1440000000	5760000000	23040000000



Sl. 38 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 [40].



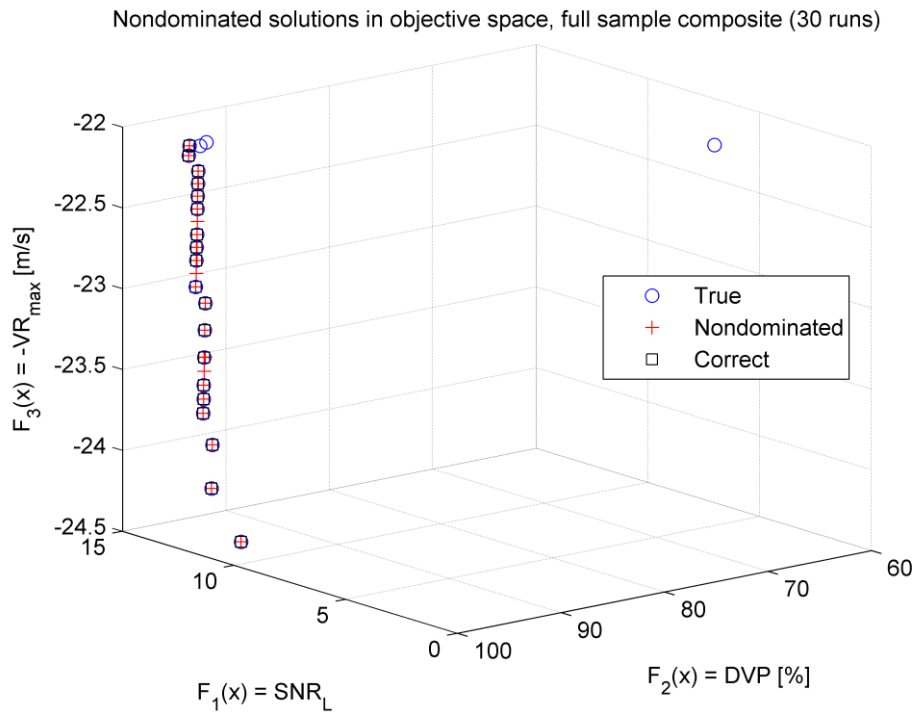
Sl. 39 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 800$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Uticaj promene broja generacija, N_G , na karakteristike performansi, prikazan je u Tab. 17, pri čemu su ostali parametri zadržani na inicijalnim vrednostima, $N_P = 100$, $p_c = 90\%$ i $p_m = 4.3478\%$. Srednji broj različitih rešenja opada sa porastom N_G , dok srednji broj tačnih rešenja najpre raste, a kasnije opada sa porastom N_G (isto ponašanje zabeleženo je i u Tab. 13). I ovde se primećuje smanjenje broja različitih, a porast broja tačnih rešenja u odnosu na rezultate iz Tab. 13, što je posledica primene korekcije rešenja. Takođe se vidi da broj (različitih) rešenja u KAPF opada sa porastom N_G , a isto važi i za broj tačnih rešenja u KAPF. Jedino se za $N_G = 25$ dobija KAPF koja sadrži svih 19 značajnih PO rešenja (Sl. 40). Potencijalni problem je što ova KAPF sadrži i 8 suvišnih rešenja, koja nisu zaista PO. Međutim, kao što se vidi sa Sl. 40, suvišna rešenja su tako pozicionirana da ne bi dovela do bitno drugačijih zaključaka prilikom analize u odnosu na analizu stvarnog PF, tako da se ova KAPF može smatrati prihvatljivom, mada svakako lošijom u odnosu na KAPF prikazane na Sl. 38 i Sl. 39.

Uticaj promene verovatnoće ukrštanja, p_c , na karakteristike performansi, prikazan je u Tab. 18, pri čemu su ostali parametri zadržani na inicijalnim vrednostima, $N_P = 100$, $N_G = 100$ i $p_m = 4.3478\%$. Ne uočava se jasna zakonitost u promeni srednjih vrednosti brojeva različitih i tačnih rešenja sa porastom p_c , što se poklapa sa opservacijama iz Tab. 14. Kada se posmatra KAPF, takođe se ne uočava jasna zakonitost u promeni brojeva različitih i tačnih rešenja sa porastom p_c .

Tab. 17 – NSGA-II+CES, uticaj broja generacija, N_G , na karakteristike performansi, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

N_G	25	50	100	200	400
min_D	6	2	2	1	1
max_D	16	13	10	9	9
μ_D	11.2667	8.7	6.4333	4.7667	4.0667
σ_D	2.4059	2.6412	2.3735	2.0792	1.9989
min_C	0	1	0	0	0
max_C	11	11	10	9	9
μ_C	4.8667	5.0667	5.4667	4.1	3.8
σ_C	1.9605	2.4626	2.7258	2.1711	2.0578
C_D	27	22	19	17	16
C_C	19	18	17	15	16
N_C	22500000	45000000	90000000	180000000	360000000

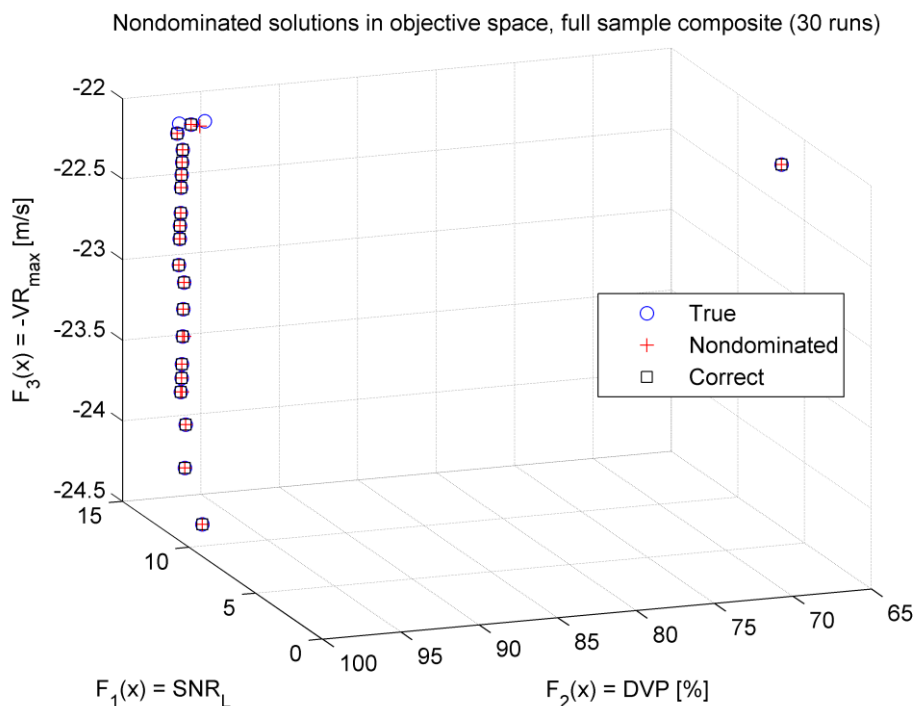


Sl. 40 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 25$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Za $p_c = 50\%$, dobija se KAPF (Sl. 41) koja sadrži 20 tačnih rešenja, ali problem je što nedostaje jedna od tačaka kraka A-B PF, preciznije tačka A, a prisutna su i 4 suvišna rešenja. Prema tome, ova KAPF nije prihvatljiva, ali je ipak bolja od KAPF dobijenih sa većim vrednostima p_c .

Tab. 18 – NSGA-II+CES, uticaj verovatnoće ukrštanja, p_c , na karakteristike performansi, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_m = 4.3478$ %), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

p_c [%]	50	60	70	80	90	100
min_D	2	2	2	1	2	1
max_D	12	10	12	11	10	11
μ_D	6.5667	5.7333	7	6.7333	6.4333	5.5333
σ_D	2.5688	1.8557	2.3342	2.6253	2.3735	2.8129
min_C	0	0	0	0	0	0
max_C	9	9	12	11	10	9
μ_C	4.6667	4.4333	5.6	5.3667	5.4667	4.1
σ_C	2.7459	2.1445	3.1028	2.8826	2.7258	2.51
C_D	24	20	19	23	19	18
C_C	20	18	16	18	17	17
N_C	90000000	90000000	90000000	90000000	90000000	90000000



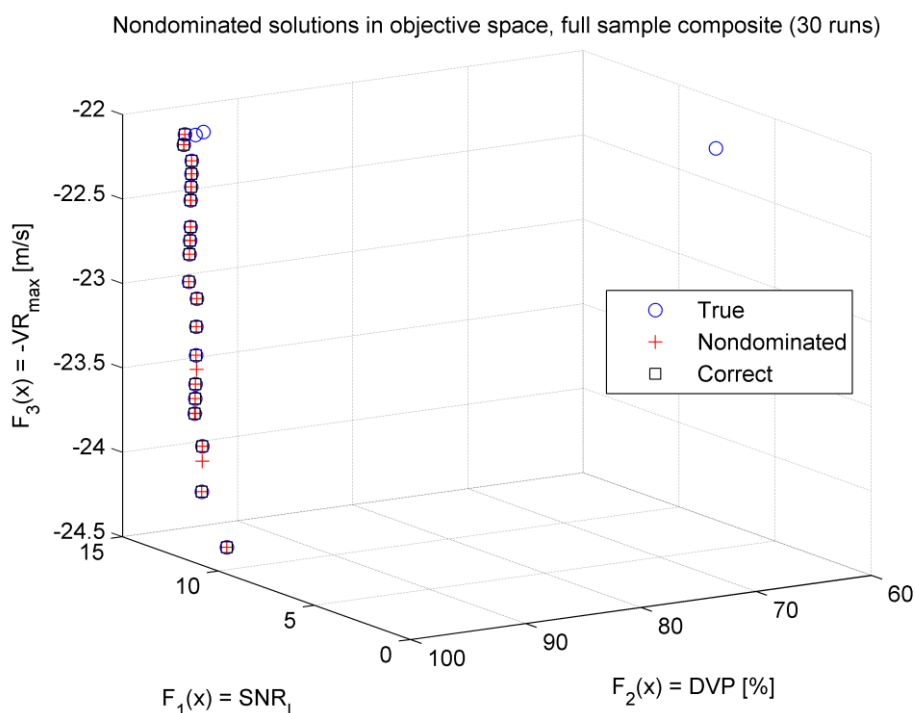
Sl. 41 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 50$ %, $p_m = 4.3478$ %, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Uticaj promene verovatnoće mutacije, p_m , na karakteristike performansi, prikazan je u Tab. 19, pri čemu su ostali parametri zadržani na inicijalnim vrednostima, $N_P = 100$, $N_G = 100$ i $p_c = 90$ %. Srednje vrednosti brojeva različitih i tačnih rešenja rastu sa porastom p_m , što se uglavnom poklapa sa opservacijama iz Tab. 15. Kada je KAPF u pitanju, vidi se da se za $p_m \geq 8.6957$ % dobija 19 ili 20 tačnih rešenja, pri čemu postoje i suvišna rešenja. Na Sl. 42 i Sl. 43 prikazane su KAPF za $p_m \geq 8.6957$ %. Vidi se da su pronađene sve tačke kraka A-B PF, kao i da su suvišna rešenja tako

pozicionirana da ne bi dovela do bitno drugačijih zaključaka prilikom analize u odnosu na analizu stvarnog PF. Prema tome, ove dve KAPF su prihvatljive.

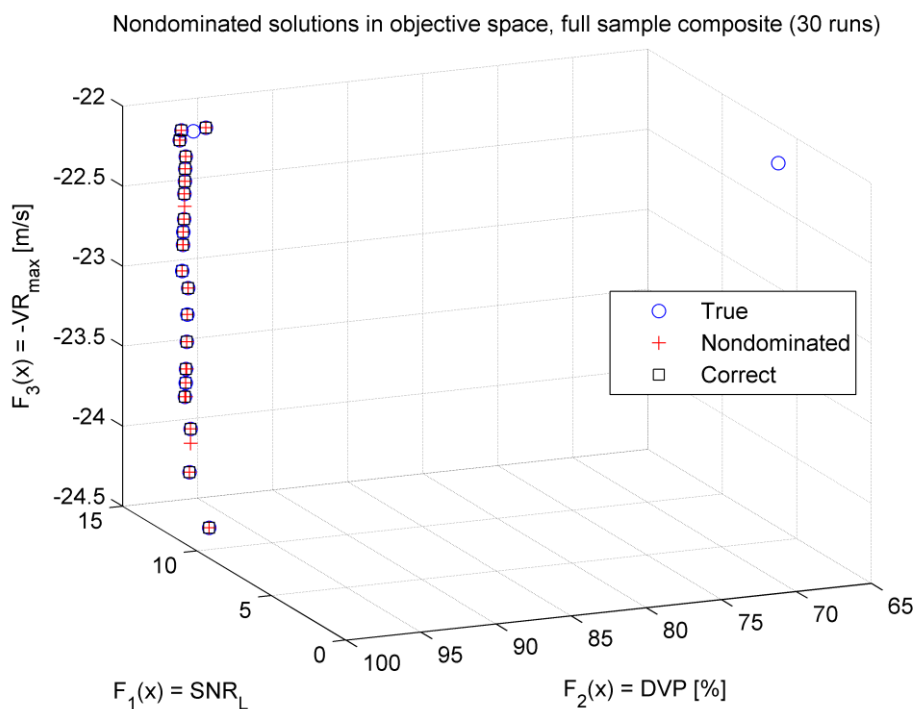
Tab. 19 – NSGA-II+CES, uticaj verovatnoće mutacije, p_m , na karakteristike performansi, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$), sa veličinom uzorka $N_R = 30$.

p_m [%]	0.54348	1.087	2.1739	4.3478	8.6957	17.3913
min_D	1	1	1	2	2	14
max_D	11	10	10	10	20	24
μ_D	3.9333	4.7	5.1667	6.4333	11.7667	18.9333
σ_D	2.0331	2.5209	2.4507	2.3735	4.191	2.7535
min_C	0	0	0	0	0	7
max_C	7	8	9	10	17	18
μ_C	1.6667	2.8	3.6	5.4667	9.1667	11.5333
σ_C	1.6046	2.4126	2.127	2.7258	4.1112	2.4031
C_D	17	19	21	19	27	26
C_C	16	17	17	17	19	20
N_C	90000000	90000000	90000000	90000000	90000000	90000000



Sl. 42 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 8.6957\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata koji su dobijeni variranjem svakog od 4 parametra NSGA-II+CES ponaosob, može se zaključiti da se prihvatljiva KAPF može dobiti povećavanjem veličine populacije i verovatnoće mutacije. Takođe, prihvatljiva KAPF se dobija kada je broj generacija mali, 25. Pri niskoj vrednosti verovatnoće ukrštanja od 50% dobija se bolja (ali ipak neprihvatljiva) KAPF nego pri višim vrednostima verovatnoće ukrštanja.



Sl. 43 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 100$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 17.3913\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

Da bi se utvrdilo kako istovremena promena (u odnosu na inicijalne vrednosti) više parametara utiče na karakteristike performansi NSGA-II+CES, sprovedeno je još šest eksperimenata. Broj generacija je zadržan na inicijalnoj vrednosti, $N_G = 100$, veličina populacije je postavljena na $N_P = 400$, što je dalo najbolje rezultate u prethodnim eksperimentima, dok su verovatnoće ukrštanja i mutacije varirane.

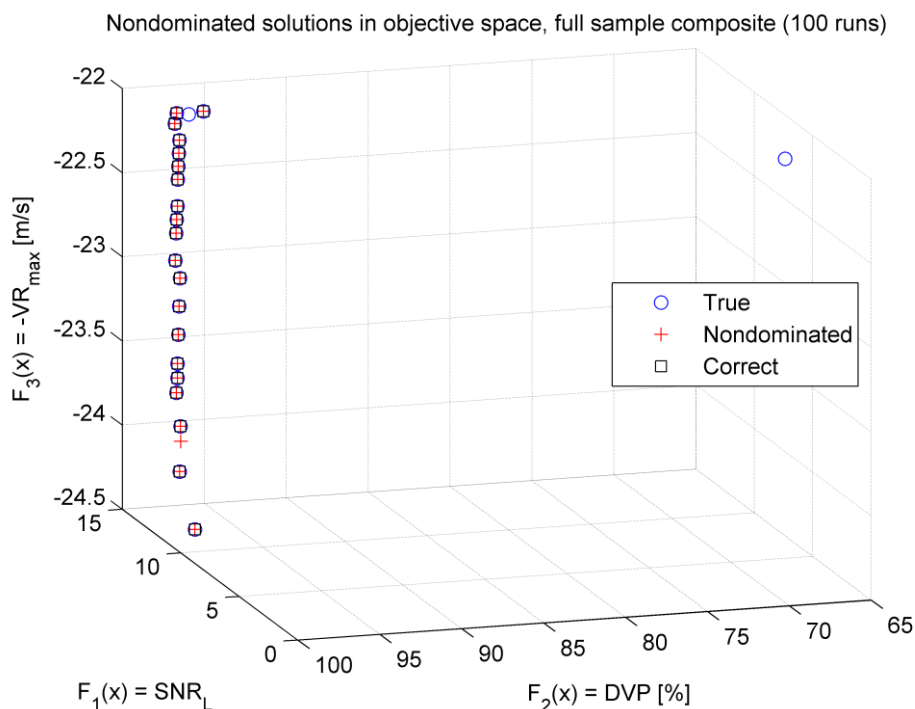
Za verovatnoću ukrštanja korišćene su dve vrednosti, 50% i 90%, a za verovatnoću mutacije tri vrednosti, 4.3478%, 8.6957% i 17.3913%. U svakom eksperimentu, broj izvršavanja NSGA-II bio je $N_R = 100$. Skupovi parametara i odgovarajuće karakteristike performansi NSGA-II+CES prikazane su u Tab. 20.

Povećavanjem verovatnoće mutacije rastu srednje vrednosti brojeva različitih i tačnih rešenja. Srednje vrednosti brojeva različitih i tačnih rešenja su neznatno veće pri verovatnoći ukrštanja 50% u odnosu na slučaj kada je verovatnoća ukrštanja 90%. Verovatnoće ukrštanja i mutacije ne utiču značajno na broj tačnih rešenja u KAPF, ali utiču na broj suvišnih rešenja koji je najveći pri verovatnoći mutacije 17.3913%. U svih šest eksperimenata dobijena je prihvatljiva KAPF, što je za dva skupa parametara ilustrirano na Sl. 44 i Sl. 45. Može se zaključiti da ni kada se više parametara algoritma istovremeno izmeni na način koji je ranijim eksperimentima utvrđen kao povoljan, pojedinačnim izvršavanjem NSGA-II ne može se dobiti dobra aproksimacija PF. KAPF pak ne zavisi suštinski od verovatnoća ukrštanja i mutacije, a njen kvalitet je očigledno posledica

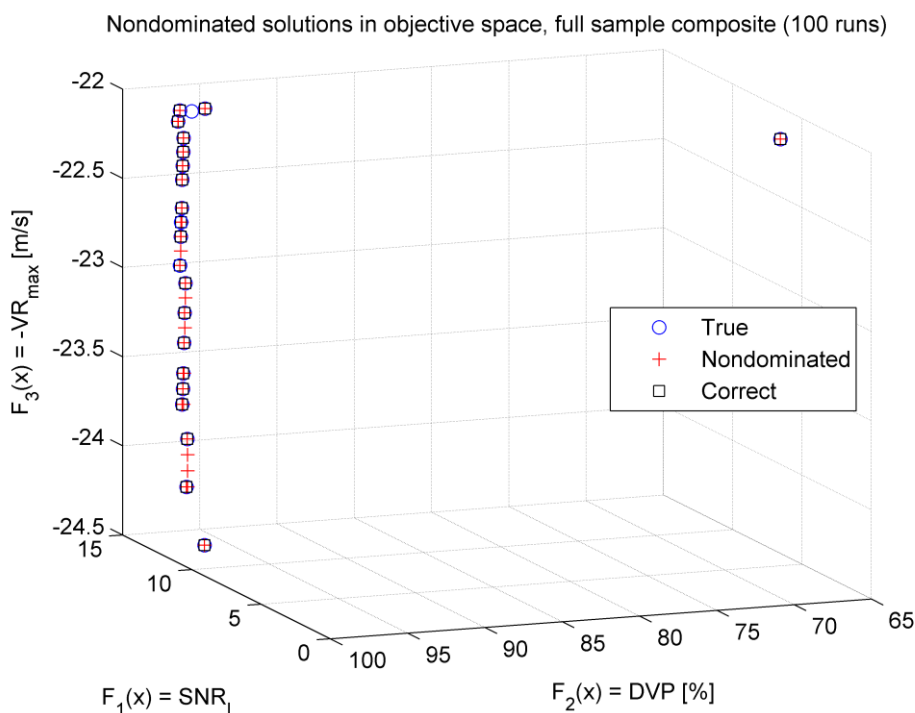
visoke vrednosti veličine populacije. Treba napomenuti da niža vrednost verovatnoće mutacije rezultuje KAPF u kojoj ima manje suvišnih rešenja (koja nisu zaista PO).

Tab. 20 – NSGA-II+CES, uticaj verovatnoće ukrštanja, p_c , i verovatnoće mutacije, p_m , na karakteristike performansi, pri fiksiranim vrednostima ostalih parametara ($N_P = 400$, $N_G = 100$), sa veličinom uzorka $N_R = 100$.

p_c [%]	50	50	50	90	90	90
p_m [%]	4.3478	8.6957	17.3913	4.3478	8.6957	17.3913
min_D	5	7	18	7	7	17
max_D	20	20	25	17	22	27
μ_D	14.23	15.05	21.14	13.05	14.89	21.63
σ_D	2.7519	2.4469	1.5571	2.4428	2.7776	1.873
min_C	5	7	16	7	7	16
max_C	19	19	20	17	19	20
μ_C	13.43	14.6	18.52	12.65	14.47	18.24
σ_C	2.7201	2.3527	0.90431	2.4345	2.7097	0.86597
C_D	25	23	28	21	24	32
C_C	21	21	21	20	21	21
N_C	4800000000	4800000000	4800000000	4800000000	4800000000	4800000000



Sl. 44 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90$ %, $p_m = 4.3478$ %, $N_R = 100$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).



Sl. 45 – Rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 17.3913\%$, $N_R = 100$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).

4.5 Diskusija o podešavanju i performansama NSGA-II+CES i NSGA-II

U Tab. 21 prikazano je 12 skupova parametara NSGA-II+CES koji su dali prihvatljive rezultate, tj. KAPF koja sadrži svih 19 tačaka kraka A-B iz stvarnog PF. U Tab. 21 za svaki skup parametara navedena je oznaka i najvažnije karakteristike performansi, broj različitih i tačnih rešenja u KAPOS, C_D i C_C , te približni broj poređenja potrebnih za dobijanje KAPOS, N_C .

Tab. 21 – Poređenje skupova parametara sa kojima NSGA-II+CES proizvodi prihvatljivu KAPF. [Translated by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 \[40\].](#)

Oznaka skupa	N_P	N_G	p_c [%]	p_m [%]	N_R	C_D	C_C	N_C
S01	400	100	90	4.3478	30	20	20	1440000000
S02	800	100	90	4.3478	30	19	19	5760000000
S03	1600	100	90	4.3478	30	19	19	23040000000
S04	100	25	90	4.3478	30	27	19	22500000
S05	100	100	90	8.6957	30	27	19	90000000
S06	100	100	90	17.3913	30	26	20	90000000
S07	400	100	50	4.3478	100	25	21	4800000000
S08	400	100	50	8.6957	100	23	21	4800000000
S09	400	100	50	17.3913	100	28	21	4800000000
S10	400	100	90	4.3478	100	21	20	4800000000
S11	400	100	90	8.6957	100	24	21	4800000000
S12	400	100	90	17.3913	100	32	21	4800000000

Korišćenjem populacije veličine $N_P = 400$, u 7 slučajeva dobijena je prihvatljiva KAPF, nezavisno od vrednosti ostalih parametara. Korišćenje $N_P > 400$ je nepotrebno jer se ne dobija na kvalitetu KAPF, a značajno se povećava N_C . Najniže vrednosti N_C se postižu kada je broj generacija mali (S04), ili kada je verovatnoća mutacije visoka (S05 i S06). Sva tri navedena skupa daju prihvatljivu KAPF, ali sa znatno većim brojem suvišnih rešenja (koja nisu zaista PO) u odnosu na pojedine slučajeve gde je $N_P = 400$ (S01 i S10). Kao uopšteno najbolji skup parametara može se preporučiti S01, jer je dao sva značajna PO rešenja, a nije dao suvišna rešenja. S04, S05 i S06 mogli bi se preporučiti za situacije gde je posebno bitno kratko vreme izvršavanja algoritma. Na osnovu rezultata prikazanih u Tab. 21, stiče se utisak da nema potrebe koristiti $N_R > 30$, jer to ne donosi značajno poboljšanje KAPF, a povećava N_C .

Broj poređenja potrebnih za egzaktno određivanje PF metodom iscrpne pretrage je $N_C^{ES} = MN_S^2$, gde je N_S ukupan broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja. Za matematički model M17, sa vrednostima parametara kao u Tab. 6 i $r_{UL}^* = 35$, $N_S = 1126884$, a $N_C^{ES} = 3809602648368$. Poređenjem ove vrednosti sa vrednostima N_C navedenim u Tab. 21, može se zaključiti da je broj poređenja u NSGA-II+CES manji od broja poređenja u iscrpnoj pretrazi za 2 do 5 redova veličine, zavisno od korišćenog skupa parametara. Za preporučeni skup parametara (S01), potrebno je približno 2600 puta manje poređenja u odnosu na iscrpnu pretragu, što je razlika od preko 3 reda veličine. Na osnovu izloženog poređenja, može se zaključiti da je NSGA-II+CES brži od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje POS. NSGA-II+CES je takođe i skalabilniji od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje POS, jer broj poređenja u NSGA-II+CES ne zavisi od broja tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja, dok u iscrpnoj pretrazi zavisi.

Izvršavanje NSGA-II+CES sa parametrima iz S01 traje manje od 18 minuta na savremenom računaru sa centralnim procesorom Intel Core i7-4700HQ, učestanosti takta 2.4 GHz i 12 GB radne memorije. Izvršavanje NSGA-II+CES sa parametrima iz S04 na istom tom računaru traje manje od 2 minuta. Nepristrasno poređenje vremena izvršavanja NSGA-II+CES i iscrpne pretrage za iste parametre M17 ne može se napraviti jer je softverski sistem kojim se vrši iscrpna pretraga u potpunosti realizovan MATLAB skriptovima koji se interpretiraju, dok je najzahtevniji deo izračunavanja u NSGA-II+CES realizovan kompajliranom aplikacijom pisanom u jeziku C.

Sa stanovišta donosioca odluka koji nije ograničen veoma kratkim vremenskim rokovima, kao što je na primer projektant radarskog sistema ili planer misije u kojoj se koristi radarski sistem, deluje da je prihvatljivo da trajanje izvršavanja NSGA-II+CES bude nekoliko minuta ili nekoliko desetina minuta. Ipak postoji interes za dodatnim skraćivanjem vremena izvršavanja, radi

eventualne mogućnosti primene u operativnim uslovima, tj. u realnom vremenu, na primer za prilagođavanje MPCIPB promenama u uslovima okoline ili režima rada radara.

Prethodno prikazani eksperimentalni rezultati pokazali su da je NSGA-II u svojoj originalnoj formi neefikasan za rešavanje optimizacionog problema koji se razmatra u ovoj studiji. Aproksimacija PF koja se dobija jednim izvršavanjem NSGA-II nije dobra ni sa stanovišta diverziteta rešenja (broj različitih rešenja na kraju izvršavanja značajno je manji od veličine populacije, tj. postoji veliki broj preklopljenih rešenja), niti sa stanovišta konvergencije prema stvarnom PF (udeo tačnih rešenja među različitim rešenjima na kraju izvršavanja je uglavnom manji od 100%, a u nekim slučajevima znatno manji od 100%). NSGA-II+CES daje dobre rezultate zahvaljujući primeni domenski specifične korekcije rešenja i formiranja KAPF na osnovu više ponovljenih izvršavanja NSGA-II, ali čak i za NSGA-II+CES poželjno je korišćenje velike populacije, $N_P \geq 400$, da bi se dobila KAPF koja je veoma bliska stvarnom PF. Cena koja se plaća je u dužem vremenu izvršavanja NSGA-II+CES, koje bi se moglo skratiti smanjenjem broja izvršavanja, N_R , kao i smanjenjem veličine populacije, N_P . Preduslov za smanjenje ova dva parametra je poboljšavanje kvaliteta rezultata samog NSGA-II, pre svega u smislu poboljšanja diverziteta rešenja, ali i u smislu poboljšanja konvergencije, mada se problem konvergencije delimično ublažava domenski specifičnom korekcijom rešenja. Pretpostavljeno je da je postojanje velikog broja preklopljenih rešenja na neki način povezano sa problemima diverziteta i konvergencije, pa je odlučeno da se po ovom pitanju konsultuje postojeća literatura. Saznanja koja su stečena pregledom literature opisana su u nastavku ovog odeljka.

Najopsežniju studiju o preklopljenim rešenjima u višeciljnim evolutivnim algoritmima (koristeći NSGA-II kao reprezentativni primer) sprovedli su Ishibuchi, Narukawa i Nojima [35]. Njihovi eksperimenti su pokazali da postojanje preklopljenih rešenja nije ozbiljan problem kada se MOEA primenjuju na probleme sa kontinualnim promenljivama odlučivanja, (videti str. 6 u [35]). Međutim, situacija je bitno drugačija kada se razmatraju problemi kombinatorne optimizacije, tj. problemi u kojima je skup dopustivih rešenja diskretan, kao što je na primer višeciljni problem ranca (eng. multi-objective knapsack problem) (videti str. 7-9 u [35]). Pokazalo se da za kombinatorne probleme broj različitih rešenja naglo pada u prvih nekoliko stotina generacija, a zatim lagano raste ili ostaje približno konstantan (videti str. 7-9 u [35]). Konkretno, za dvociljni problem ranca sa 750 predmeta, broj različitih rešenja pada na ispod 30% veličine populacije nakon približno 300 generacija, a zatim lagano raste i asimptotski teži ka 70% veličine populacije (videti sl. 8 u [35]). Interesantno je da je u [35] kao kriterijum za zaustavljanje NSGA-II korišćena vrednost $N_G = 3000$, što je znatno više od maksimalne vrednosti N_G korišćene u ovoj studiji.

Rezultati prikazani u Tab. 13 načelno se slažu sa rezultatima iz [35] u smislu naglog pada broja različitih rešenja u prvih nekoliko stotina generacija.

Ishibuchi i ostali su zatim utvrdili da se smanjenjem verovatnoće ukrštanja i povećanjem verovatnoće mutacije povećava broj različitih rešenja (videti str. 9 u [35]). Takva specifikacija parametara rezultovala je u poboljšanju diverziteta rešenja, uz degradaciju konvergencije ka stvarnom PF (videti str. 10 u [35]). Rezultati prikazani u Tab. 14 ne pokazuju jasno da postoji uticaj verovatnoće ukrštanja na broj različitih rešenja. Doduše, minimalna vrednost verovatnoće ukrštanja korišćena u ovoj studiji je 50%, dok je u [35] korišćena znatno niža vrednost od 20%, što je možda jedan od uzroka za različita zapažanja u te dve studije. Sa druge strane, rezultati ove studije navedeni u Tab. 15 jasno pokazuju da broj različitih rešenja raste sa porastom verovatnoće mutacije, što je u saglasnosti sa rezultatima iz [35].

Ishibuchi i ostali su ispitali kako dve strategije uklanjanja preklopljenih rešenja (uklanjanje preklopljenih vektora u dopustivom prostoru ciljeva i uklanjanje preklopljenih vektora u dopustivom prostoru odlučivanja), kao i druge tehnike, utiču na diverzitet i konvergenciju (videti str. 12-16 u [35]). Utvrdili su da se uklanjanjem preklopljenih vektora iz unije populacija R_t pre formiranja naredne populacije P_{t+1} , značajno povećava broj različitih rešenja, ali da to ima mali pozitivan uticaj na diverzitet, a nema negativan uticaj na konvergenciju (videti str. 13 u [35]). Takođe su utvrdili da se povećavanjem veličine turnira koji se koristi prilikom selekcije postiže poboljšanje diverziteta rešenja uz degradaciju konvergencije rešenja prema stvarnom PF, pri čemu primena bilo koje od dve strategije uklanjanja preklopljenih rešenja nema značajnog efekta na performanse algoritma (videti str. 15 u [35]). Konačno, ispitali su modifikaciju NSGA-II u kojoj se selekcija roditelja ne vrši na osnovu *crowded-comparison* operatora već na osnovu ponderisane sume vrednosti funkcija cilja (videti str. 15-16 u [35]). Utvrdili su da pomenuta modifikacija u kombinaciji sa strategijama uklanjanja preklopljenih rešenja i povećanom veličinom turnira daje dobre rezultate u smislu značajnog poboljšanja diverziteta rešenja, uz samo blagu degradaciju konvergencije rešenja prema stvarnom PF (videti str. 16 u [35]).

Studija koju su sprovedeli Zhu, Xie, Zheng, Luo i Li [36] posvećena je temi preklopljenih rešenja u MOEA, pri čemu je u fokusu NSGA-II sa realnom reprezentacijom rešenja, gde je problem preklopljenih rešenja izraženiji nego kod NSGA-II sa binarnom reprezentacijom rešenja (videti str. 16 u [36]). Podsetimo da su Ishibuchi i ostali imali drugačije zapažanje, tj. manju zastupljenost preklopljenih rešenja u problemima sa kontinualnim promenljivama odlučivanja (videti str. 6 u [35]), što je možda posledica ispitivanja različitih optimizacionih problema. Zhu i ostali su zaključili da preklopljena rešenja uglavnom nastaju tokom ukrštanja (videti str. 16 u [36]). Ne samo da neke jedinice prolaze nepromenjene kroz proces ukrštanja, jer je verovatnoća ukrštanja

najčešće manja od 100%, već i samim ukrštanjem može doći do nastanka naslednika koji su isti kao roditelji (videti str. 16 i sl. 3 u [36]). Za NSGA-II sa realnom reprezentacijom rešenja, Zhu i ostali su izveli teorijsku formulu za gornju granicu broja preklopljenih rešenja i za jedan konkretan skup parametara NSGA-II eksperimentom dobili vrednost broja preklopljenih rešenja, koja je bliska teorijskim predviđanjima (videti str. 17 u [36]).

Zhu i ostali ispitali su efekte eksplicitnog uklanjanja preklopljenih rešenja i zaključili da ono ima primetan pozitivan efekat na diverzitet rešenja (videti str. 18 u [36]). Podsetimo da su Ishibuchi i ostali imali drugačija zapažanja, tj. mali pozitivan efekat (videti str. 13 u [35]), što se možda može objasniti činjenicom da su oni razmatrali kombinatorni problem sa binarnom reprezentacijom rešenja, dok su Zhu i ostali razmatrali probleme sa realnom reprezentacijom rešenja. Konačno, Zhu i ostali zaključuju da se preklopljena rešenja stvaraju procesom ukrštanja, a da njihovo eventualno zadržavanje u narednoj populaciji zavisi od načina na koji se vrši selekcija (videti str. 18 u [36]). Teorijskom analizom, zaključili su da se kod druga dva popularna evolutivna algoritma, SPEA2 i ϵ -MOEA, preklopljena rešenja ne pojavljuju, ili se retko pojavljuju u konačnoj populaciji (videti str. 18 u [36]).

Potencijalno relevantna za problem izbora MPCIPB je i studija koju su sproveli Ishibuchi, Yamane i Nojima [46], na temu efikasnosti MOEA kod problema sa diskretnim funkcijama cilja sa različitim granularnostima. Funkcije cilja sa malim brojem diskretnih vrednosti podsećaju na stepenište sa malim brojem ravnih stepenika i predstavljaju problem za algoritme pretraživanja jer je za mnoga različita rešenja vrednost funkcije cilja ista, što otežava lokalnu pretragu (videti str. 481 u [46]). U našem problemu dve funkcije cilja, SNR_L i DVP imaju opisane karakteristike kao što se može videti sa Sl. 10 i Sl. 11. Ishibuchi i ostali ispitali su ponašanje četiri dobro poznata i često korišćena MOEA (uključujući NSGA-II) na kombinatornim problemima sa dve diskretne funkcije cilja sa različitim granularnostima i zaključili da razlika u granularnostima polarizuje (eng. bias) pretragu ka određenom delu dopustivog prostora ciljeva (videti str. 488 u [46]). Takođe su otkrili da dodavanje malog šuma na diskretnu funkciju cilja sa grubom granularnošću popravlja sposobnost pretraživanja pojedinih MOEA (videti str. 488 u [46]). Ishibuchi i ostali nisu uspeli da jasno identifikuju uzroke zapaženih pojava (videti str. 488 u [46]).

Prethodno predstavljena analiza relevantne literature pokazuje da su se i drugi istraživači sreli sa problemima koji su slični problemima uočenim u ovoj studiji. Preklopljena rešenja nastaju u procesu ukrštanja u NSGA-II, a dodavanje mehanizma za njihovo uklanjanje ima pozitivan efekat na diverzitet rešenja, pri čemu efekat varira od nezatnog do primetnog zavisno od vrste optimizacionog problema i dodatnih modifikacija NSGA-II koje su primenjene. Međutim, mišljenje kandidata je da uklanjanje preklopljenih rešenja nije prikladna tehnika za optimizacioni problem

koji se razmatra u ovoj studiji. Naime, uklanjanjem preklopljenih rešenja postiglo bi se da broj različitih rešenja u konačnoj populaciji bude jednak ili skoro jednak veličini populacije (videti str. 13 u [35]), dok kardinalnost stvarnog POS može biti i nekoliko puta manja od veličine populacije. Posledica bi bilo postojanje velikog broja suvišnih rešenja koja nisu zaista PO, što nije poželjno. Sa druge strane, u cilju povećavanja efikasnosti NSGA-II za problem izbora MPCIPB, može se razmotriti primena drugih tehnika koje su primenjene u radovima Ishibuchi-ja [35] i [46], kao što je povećavanje veličine turnira, selekcija na osnovu ponderisane sume vrednosti funkcija cilja i dodavanje šuma na funkcije cilja sa grubom granularnošću.

5 Evaluacija performansi efikasnog algoritma za izbor impulsne povorke i diskusija o rezultatima studije, njihovom potencijalnom značaju i pravcima daljeg istraživanja

U ovom poglavlju biće sprovedena evaluacija performansi NSGA-II+CES na matematičkom modelu M19 optimizacionog problema izbora MPCIPB. Na osnovu rezultata evaluacije, te na osnovu definicije M19 i analize njegovih karakteristika iz trećeg poglavlja, dokazaće se istinitost hipoteza postavljenih u uvodnom poglavlju. Nakon toga, analiziraće se značaj rezultata ove studije za praktičnu primenu u inženjerstvu u domenu radarskih sistema. Konačno, razmotriće se potencijalna dalja unapređenja matematičkog modela i optimizacionog algoritma.

5.1 Evaluacija performansi NSGA-II+CES na matematičkom modelu M19

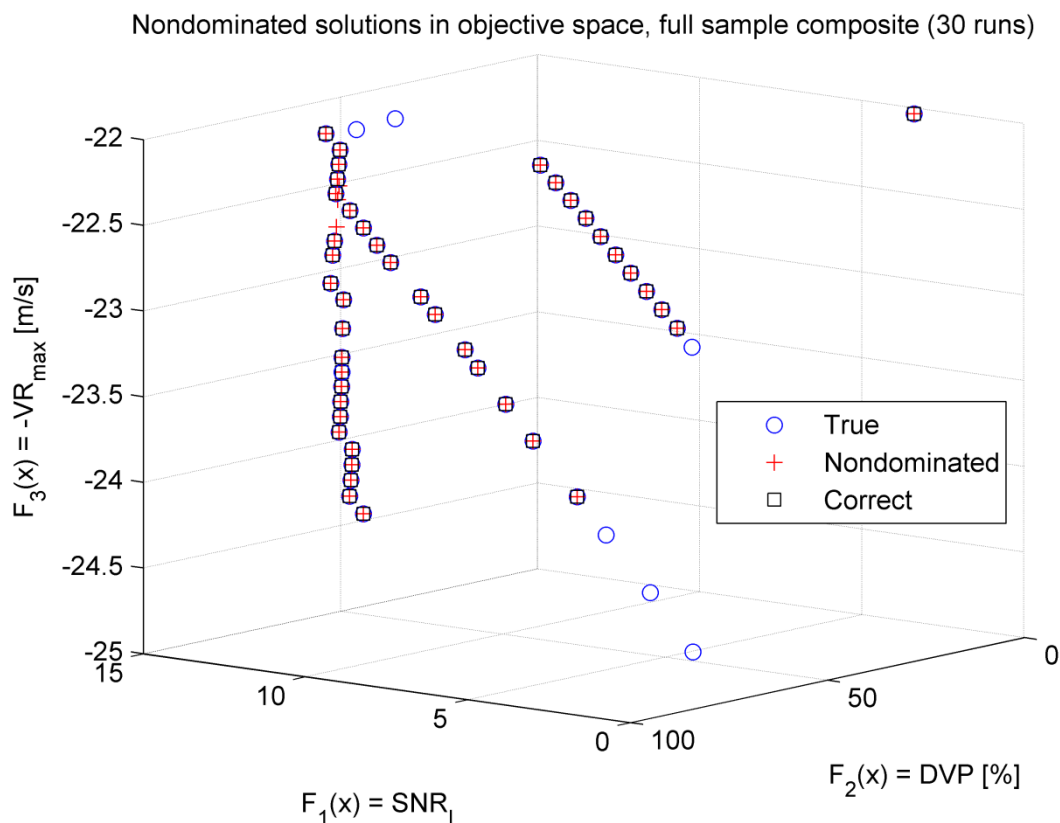
Sa obzirom na to da je inicijalna softverska realizacija NSGA-II+CES bila prilagođena matematičkom modelu M17, bila je neophodna određena modifikacija softverskog sistema zbog razlika koje postoje između M17 i M19. Ključne razlike se odnose na dodatnu funkciju ograničenja u M19, drugačiji način računanja funkcije cilja *DVP*, i dva parametra modela koji su postali suvišni u M19. Pošto, za razliku od M17, računanje širine osnovne slepe zone u M19 ne uključuje numeričku integraciju, moglo bi se očekivati da izvršavanje NSGA-II+CES na M19 bude brže nego na M17.

Odlučeno je da se za potrebe evaluacije performansi koriste isti parametri M19 kao u Tab. 9, koji se odnose na hipotetički savremeni VHF radar, te da se usvoji $r_{UL}^* = 35$, isto kao i prilikom analize M19 metodom iscrpne pretrage. Zahvaljujući tome, egzaktne POS i PF dobijeni iscrpnom pretragom u odeljku 3.3.2 mogu da se koriste kao referenca za utvrđivanje performansi po pitanju tačnosti KAPF koju daje NSGA-II+CES. Pošto je analizom egzaktnog PF u odeljku 3.3.2 utvrđeno da je samo krak A-B egzaktnog PF, prikazanog na Sl. 25, relevantan za donosioca odluke, tačnost aproksimacije KAPF će se ocenjivati samo u odnosu na krak A-B.

Performanse NSGA-II+CES po pitanju brzine i skalabilnosti ocenjivaće se na osnovu broja operacija poređenja potrebnih za određivanje KAPOS, poređenjem sa brojem operacija poređenja potrebnih za određivanje egzaktnog POS metodom iscrpne pretrage. Pored toga, biće izmerena i vremena izvršavanja NSGA-II+CES na savremenim računarskim sistemima.

Test performansi NSGA-II+CES na matematičkom modelu M19 sastoji se od jednog izvršenja NSGA-II+CES sa vrednostima parametara $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, što odgovara skupu parametara S01 iz Tab. 21, za koji je ispitivanjem na M17 zaključeno da je uopšteno najbolji.

Rezultati testa prikazani su na Sl. 46, u vidu poređenja KAPF dobijene pomoću NSGA-II+CES i egzaktnog PF dobijenog iscrpnom pretragom. Vidi se da je NSGA-II+CES uspeo da pronađe sve tačke kraka A-B stvarnog PF, a da nije uspeo da pronađe samo 6 tačaka ostalih, nerelevantnih krakova PF. KAPF sadrži 3 suvišna rešenja, koja su međutim tako pozicionirana da ne bi dovela do značajnih grešaka prilikom donošenja odluke.



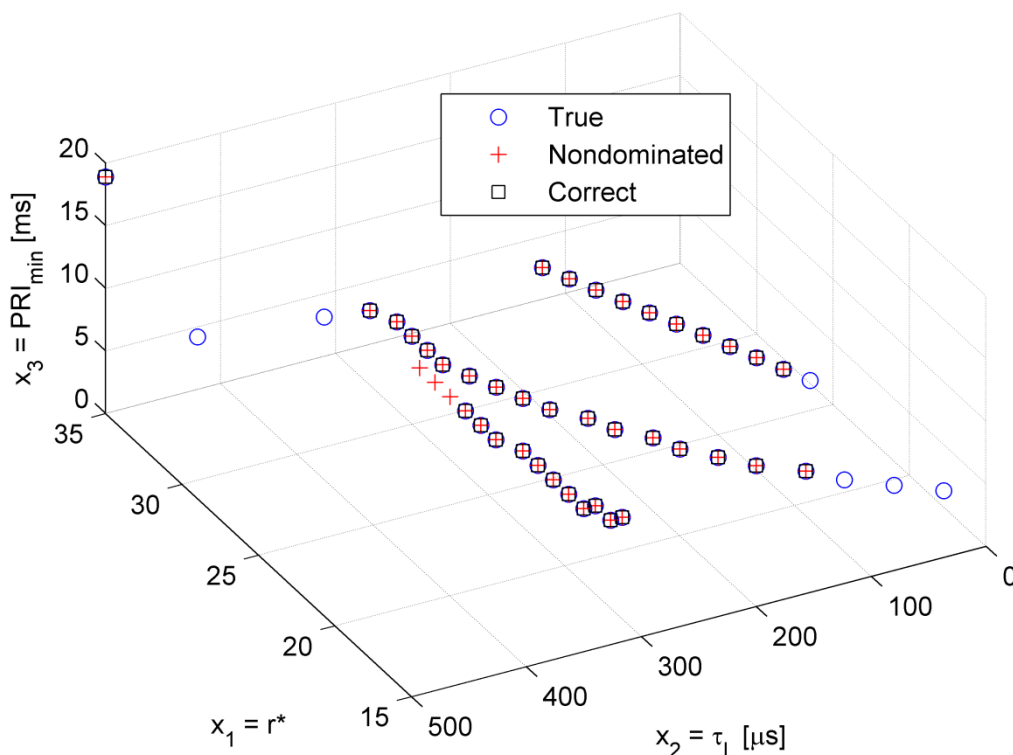
Sl. 46 – M19, rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, stvarni PF (plavi krugovi), KAPF (crveni krstići), presek PF i KAPF (crni kvadrati).
[Reprinted by permission from John Wiley and Sons: John Wiley and Sons, IET Radar, Sonar & Navigation, 'Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar' by M. Jevtić, et al., © The Institution of Engineering and Technology 2019 \[40\].](#)

Na Sl. 47 rezultati testa prikazani su i u vidu poređenja KAPOS dobijene pomoću NSGA-II+CES i egzaktnog POS dobijenog iscrpnom pretragom. Rezultati testa indikuju da je sa stanovišta tačnosti NSGA-II+CES efikasan optimizacioni algoritam za problem izbora MPCIPB sa matematičkim modelom M19.

Za primer korišćen u testu, ukupan broj tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja je $N_S = 1102106$, na osnovu čega približan broj operacija poređenja potreban za određivanje egzaktnog POS iznosi $N_C^{ES} = MN_S^2 = 3643912905708$. Sa druge strane, približan broj operacija poređenja potreban za određivanje KAPOS pomoću NSGA-II+CES je $N_C = 1440000000$. Prema broju operacija poređenja potrebnih za određivanje POS, NSGA-II+CES je od iscrpne pretrage brži

približno 2500 puta, što je razlika od preko 3 reda veličine. NSGA-II+CES je uz to i skalabilniji, jer broj poređenja u NSGA-II+CES ne zavisi od broja tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja.

Nondominated solutions in design space, full sample composite (30 runs)



Sl. 47 – M19, rezultati izvršavanja NSGA-II+CES sa parametrima $N_P = 400$, $N_G = 100$, $p_c = 90\%$, $p_m = 4.3478\%$, $N_R = 30$, stvarni POS (plavi krugovi), KAPOS (crveni krstići), presek POS i KAPOS (crni kvadrati).

Izvršavanje NSGA-II+CES na M19 sa parametrima iz S01 traje manje od 2.5 minuta na savremenom računaru sa centralnim procesorom Intel Core i7-4700HQ, učestanosti takta 2.4 GHz i 12 GB radne memorije. Podsetimo se da je na istom tom računaru izvršavanje NSGA-II+CES na M17 sa parametrima iz S01 trajalo nešto manje od 18 minuta. Pored ranije navedenih prednosti M19 u odnosu na M17, dodatni dobitak je kraće vreme izvršavanja, zahvaljujući tome što se u M19 širina osnovne slepe zone računa formulom u analitičkom obliku, dok se u M17 vrši numerička integracija i pretraživanje.

Da bi se stekao kompletniji uvid u brzinu izvršavanja NSGA-II+CES, izvršena su dodatna merenja na savremenom računaru sa centralnim procesorom Intel Core i7-7700K, učestanosti takta 4.2 GHz i 16 GB radne memorije. Na tom računaru izvršavanje NSGA-II+CES na M19 sa parametrima iz S01 traje približno 94 sekunde, tj. malo više od 1.5 minuta, dok izvršavanje sa parametrima iz S04 traje manje od 10 sekundi.

5.2 Dokaz istinitosti polaznih hipoteza

Polazne hipoteze od H1 do H4, koje se odnose na predmetni problem izbora MPCIPB, biće dokazane svođenjem na protivrečnost.

5.2.1 Dokaz istinitosti hipoteze H1

Hipoteza H1 glasi: „Postoje slučajevi gde za predmetni problem ne postoji jedinstveno optimalno rešenje, već skup PO rešenja“.

Pretpostavimo da je istinita suprotna hipoteza $\neg H1$, koja glasi: „Predmetni problem uvek ima jedinstveno optimalno rešenje“. Međutim, hipoteza $\neg H1$ je u kontradikciji sa nalazima koji su dobijeni numeričkom simulacijom u odeljku 3.3.2, gde je pokazan jedan primer u kojem predmetni problem nema jedinstveno optimalno rešenje već više PO rešenja. Pošto hipoteza $\neg H1$ u uniji sa saznanjima dobijenim numeričkom simulacijom dovodi do kontradikcije, sledi da je hipoteza H1 istinita.

5.2.2 Dokaz istinitosti hipoteze H2

Hipoteza H2 glasi: „Postoje slučajevi gde PF ima deo u kojem je moguće među ciljevima ostvariti trampu, koja je od praktičnog značaja, tj. ne podrazumeva značajan relativni gubitak u jednom cilju zarad zanemarljivog relativnog dobitka u drugom“.

Pretpostavimo da je istinita suprotna hipoteza $\neg H2$, koja glasi: „PF za predmetni problem je takav da prelazak iz jedne u drugu tačku uvek dovodi do zanemarljivog poboljšanja jednog cilja na uštrb značajnog pogoršanja drugih ciljeva“. Međutim, hipoteza $\neg H2$ je u kontradikciji sa nalazima koji su dobijeni numeričkom simulacijom u odeljku 3.3.2, gde je pokazan jedan primer u kojem PF ima deo koji nudi trampu od praktičnog značaja između funkcija cilja – u pitanju je krak A-B na Sl. 25. Pošto hipoteza $\neg H2$ u uniji sa saznanjima dobijenim numeričkom simulacijom dovodi do kontradikcije, sledi da je hipoteza H2 istinita.

5.2.3 Dokaz istinitosti hipoteze H3

Hipoteza H3 glasi: „U okviru vektora promenljivih odlučivanja, moguće je vektor PRI zameniti drugim promenljivama odlučivanja na takav način da kardinalnost vektora promenljivih odlučivanja ne zavisi od broja PRI N “.

Pretpostavimo da je istinita suprotna hipoteza $\neg H3$, koja glasi: „U okviru vektora promenljivih odlučivanja, nije moguće vektor PRI zameniti drugim promenljivama odlučivanja na takav način da kardinalnost vektora promenljivih odlučivanja ne zavisi od broja PRI N “. Međutim, hipoteza $\neg H3$ je u kontradikciji sa definicijom promenljivih odlučivanja u odeljku 3.1.1, gde je

predstavljena jedna transformacija kojom se uz pomoć dve promenljive odlučivanja indirektno predstavlja ceo skup PRI, nezavisno od njegove kardinalnosti. Pošto hipoteza $\neg H3$ u uniji sa definicijom promenljivih odlučivanja dovodi do kontradikcije, sledi da je hipoteza $H3$ istinita.

5.2.4 Dokaz istinitosti hipoteze $H4$

Hipoteza $H4$ glasi: „Postoji aproksimativan metod rešavanja predmetnog problema, koji daje rešenje blisko egzaktnom rešenju dobijenom metodom iscrpne pretrage, ali je skalabilniji i brži od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje PO skupa rešenja“.

Pretpostavimo da je istinita suprotna hipoteza $\neg H4$, koja glasi: „Ne postoji aproksimativan metod rešavanja predmetnog problema, koji daje rešenje blisko egzaktnom rešenju dobijenom metodom iscrpne pretrage, pri čemu je skalabilniji i brži od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje PO skupa rešenja“. Međutim, hipoteza $\neg H4$ je u kontradikciji sa nalazima u odeljku 5.1, gde je pokazano da je algoritam NSGA-II+CES brži i skalabilniji od iscrpne pretrage, kada se gleda broj operacija poređenja potrebnih za određivanje POS, a da je pri tome efikasan sa stanovišta tačnosti. Pošto hipoteza $\neg H4$ u uniji sa nalazima iz odeljka 5.1 dovodi do kontradikcije, sledi da je hipoteza $H4$ istinita.

5.3 Značaj NSGA-II+CES za praktičnu primenu

Za projektanta radarskog sistema, NSGA-II+CES bi mogao da bude koristan alat. Naime, ako radarski sistem radi u režimu određenom tačkom u POS, performanse sistema će načelno biti bolje u odnosu na režim rada koji odgovara tački dopustivog prostora odlučivanja koja nije PO. Moglo bi se postaviti pitanje zašto bi projektant koristio NSGA-II+CES, koji daje aproksimaciju POS, a ne iscrpnu pretragu koja daje egzaktan POS? Međutim, i u fazi projektovanja vreme je bitan faktor. KAPOS koju daje NSGA-II+CES je dovoljna i za potrebe projektovanja, jer prema obavljenim testovima uključuje delove POS koji su relevantni za donosioca odluke, u ovom slučaju projektanta. Sa druge strane, projektant bi dobijao rezultate brže nego iscrpnom pretragom, što bi dovelo do uštede u broju radnih časova provedenih u projektovanju.

NSGA-II+CES bi bio koristan alat i za korisnike radarskog sistema. Planer misije bi mogao unapred da pomoću NSGA-II+CES odredi POS, u skladu sa očekivanim načelnim potrebama misije, iskazanim kroz parametre matematičkog modela M19. Planer misije bi zatim mogao da unese relevantne tačke POS u računarski sistem radara, tako da operater tokom operativnog rada može da menja MPCIPB prelaskom iz jedne u drugu tačku POS, u skladu sa potrebama situacije na terenu. Podsetimo se da je analizom PF za M19, prikazanom na Sl. 25, utvrđeno da se prelaskom iz tačke B u tačku A, SNR_L poboljšava za 16%, na račun relativnog pogoršanja DVP za 6,8%. Operater bi tokom operativnog rada mogao da bira jednu od ove dve tačke, ili neku od tačaka kraka

A-B između A i B, u zavisnosti od toga da li mu je bitnije rano otkrivanje objekata, kada bi mu više odgovarala tačka A, ili praćenje bliskih objekata nad zonom izraženog klatera, kada bi mu više odgovarala tačka B.

Analizom formula za funkcije cilja u modelu M19 (78), i dodatnih jednakosti (60), (61), (71) i (73) koje se koriste prilikom izračunavanja *DVP*, vidi se da sve funkcije cilja zavise od ugaone brzine okretanja antene ω , a da *DVP* zavisi i od standardne devijacije spektra klatera usled vetra σ_{fw} . Kod pojedinih osmatračkih radara, brzina okretanja antene se može menjati tokom operativnog rada, na zahtev operatera, i predstavlja jedan od parametara radnog režima radara. Sa druge strane, standardna devijacija spektra klatera usled vetra je faktor okoline koji zavisi od trenutne vetrovitosti u prostoru osmatranja radara i može se menjati tokom operativnog rada nezavisno od volje operatera, mada operater može biti svestan da je promena nastala. Promenom jednog od ova dva parametra matematičkog modela, izrazi za funkcije ciljeva se menjaju, i moguće je da dođe do promene POS. Da bi radar nastavio da funkcioniše optimalno, bilo bi neophodno odrediti novi POS, i prema njemu prilagoditi MPCIPB nastalim promenama u radnom režimu radara ili uslovima okoline.

Određivanje POS, tj. re-optimizacija MPCIPB u toku operativnog rada radara zahtevala bi izvršavanje NSGA-II+CES u realnom vremenu. Pitanje rada u realnom vremenu je povezano sa rokom (eng. deadline) koji je zadat za izvršenje određene operacije, a koji u ovom slučaju zavisi od toga koliko kašnjenje operater može da prihvati, a da to ne narušava značajno kvalitet podataka koji nastaju radarskim osmatranjem. U odeljku 5.1 pokazano je da su rokovi koje NSGA-II+CES može da ispuni u rasponu od nekoliko desetina sekundi do nekoliko stotina sekundi, zavisno od hardverske platforme i potrebnog kvaliteta KAPF. Kada je u pitanju prilagođavanje MPCIPB promenama u vetrovitosti, informacija o nastanku te promene bi najverovatnije do operatera dolazila spolja, iz udaljenog meteorološkog centra i već bi bila zakašnjena, tako da dodatno kašnjenje reda veličine 10 ili 100 sekundi ne deluje kao značajan problem. Sa druge strane, promena brzine okretanja antene ima reperkusije ne samo na optimalnost MPCIPB, već i na rad drugih podsistema u radaru, na primer modula za automatsko praćenje pokretnih objekata. Deluje da će u slučaju promene brzine okretanja antene svakako postojati prelazni režim u kojem bi moglo doći do gubitaka podataka o tragovima nekih objekata. U tom svetlu, kratkotrajan rad sa neoptimalnim MPCIPB ili namerno uvođenje kašnjenja u zadavanju nove brzine dok se ne izvrši prilagođenje MPCIPB ne bi imali drastičan negativan uticaj na rad sistema. Na osnovu ličnog stručnog iskustva kandidata, deluje da bi rokovi reda veličine 10 ili 100 sekundi mogli biti prihvatljivi sa stanovišta re-optimizacije MPCIPB u realnom vremenu, ali konačan sud po tom pitanju bi ipak trebalo da donesu korisnici radarskog sistema. U svakom slučaju, primena

NSGA-II+CES bi poboljšala sposobnost radarskog sistema za prilagođavanje MPCIPB promenama u režimu rada radara ili promenama u uslovima okoline, u realnom vremenu.

5.4 Mogući pravci daljeg istraživanja

Matematički model M19 i optimizacioni algoritam NSGA-II+CES mogli bi biti osnova za dalja istraživanja.

5.4.1 Mogući pravci daljeg istraživanja u vezi matematičkog modela

U matematičkom modelu M19, ceo skup PRI je zamenjen sa dve promenljive odlučivanja koje ga indirektno određuju – željenim povećanjem prve prave slepe Doplerove frekvencije r^* i najkraćim PRI u skupu PRI PRI_{min} , čime je postignuto da je broj promenljivih odlučivanja uvek isti, nezavisno od broja PRI N . Transformacije koje omogućuju pomenutu zamenu opisane su u odeljku 3.1.1. Međutim, u apstraktu [48] navedeno je da se skup promenljivih odlučivanja koje uzimaju vrednosti iz istog skupa može zameniti jednom celobrojnom promenljivom – leksikografskim indeksom kombinacije, bez obzira na kardinalnost skupa promenljivih odlučivanja. Štaviše, u [48] se navodi da se pomenuti princip može primeniti u problemu optimizacije talasnog oblika u impulsnom Dopler radaru. Ideja upotrebe leksikografskog indeksa kombinacije PRI kao promenljive odlučivanja u problemu optimalnog izbora MPCIPB razrađena je u [49]. Šema na osnovu koje je u M19 ceo skup PRI zamenjen sa r^* i PRI_{min} , ograničava izbor kombinacije vrednosti PRI oslanjajući se na raspoređivanje PRI oko željene srednje vrednosti PRI na način koji se a priori smatra optimalnim [49]. Zamena skupa PRI leksikografskim indeksom, umesto promenljivama r^* i PRI_{min} , ne samo da bi smanjila ukupan broj promenljivih odlučivanja za jedan, već bi eliminisala bilo kakva a priori ograničenja u pogledu izbora kombinacije vrednosti PRI [49]. Upotreba leksikografskog indeksa kao promenljive odlučivanja oslanja se na algoritam koji na osnovu leksikografskog indeksa pronalazi odgovarajuću kombinaciju PRI. U [49] identifikovan je jedan takav algoritam, *ACM Algorithm 515* [50], i ispitana je brzina njegovog izvršavanja na savremenom računaru. Na osnovu rezultata ispitivanja, procenjeno je da korišćenje leksikografskog indeksa kao promenljive odlučivanja u problemu izbora MPCIPB ne bi značajno produžilo vreme izvršavanja NSGA-II+CES potrebno za određivanje KAPOS [49]. Na osnovu iznetih informacija, primarni pravac mogućeg daljeg istraživanja u vezi matematičkog modela odnosio bi se na uvođenje leksikografskog indeksa kombinacije PRI kao promenljive odlučivanja umesto promenljivih r^* i PRI_{min} , analizu karakteristika na taj način izmenjenog matematičkog modela i analizu uticaja izmena na karakteristike POS i PF.

Još jedan pravac mogućeg daljeg istraživanja u vezi matematičkog modela, koji bi se nadovezao na prethodno opisan primarni pravac, odnosio bi se na uvođenje broja PRI N kao promenljive odlučivanja.

5.4.2 Mogući pravci daljeg istraživanja u vezi optimizacionog algoritma

U ovoj studiji je stvarni PF, određen metodom iscrpne pretrage, poslužio kao referenca za validaciju KAPF i pronalaženje najboljeg skupa parametara NSGA-II+CES. Postavlja se pitanje kako će se pronalaziti najbolji skup parametara kada se algoritam bude primenjivao na optimizacioni problem sa proširenim prostorom odlučivanja, gde bi određivanje egzaktnog PF iscrpnom pretragom moglo biti nepraktično. Jedan od pravaca daljeg istraživanja bi se mogao odnositi na proučavanje raspoložive literature, kao što su članci [51] i [52], u potrazi za metrikama za evaluaciju aproksimacije PF kada nije poznat stvarni PF.

Broj izvršavanja NSGA-II, N_R , je jedan od parametara NSGA-II+CES. U ovoj studiji nije istražena tema optimalnog izbora N_R , kao ni tema ponovljivosti rezultata. Ove dve povezane teme mogle bi biti predmet daljeg istraživanja. Analiza bi se mogla sprovesti na već prikupljenim uzorcima primenom metoda ponovnog uzorkovanja (eng. resampling), kao što su *jackknife* ili *subsampling* [53].

Jedan od mogućih pravaca istraživanja bi moglo biti ubrzavanje izvršavanja NSGA-II+CES, paralelizacijom pojedinačnih izvršenja NSGA-II, sa obzirom na to da su međusobno nezavisna. Na taj način bi se mogle optimalno iskoristiti višejezgarne arhitekture modernih centralnih procesora, i postići faktor ubrzanja ne veći od broja jezgara.

Drugi mogući pravac istraživanja na temu ubrzanja NSGA-II+CES mogao bi se odnositi na poboljšanje efikasnosti samog NSGA-II za koji se pokazalo da je u svojoj originalnoj formi neefikasan za rešavanje predmetnog problema, u smislu nezadovoljavajućeg diverziteta rešenja i nezadovoljavajuće konvergencije prema stvarnom PF. Kada bi se pojedinačnim izvršenjima NSGA-II dobijali bolji rezultati, mogao bi se smanjiti broj izvršavanja NSGA-II, N_R , što bi skratilo ukupno vreme izvršavanja NSGA-II+CES. U odeljku 4.5 navedene su neke tehnike koje bi se mogle ispitati u kontekstu poboljšavanja efikasnosti NSGA-II, kao što su povećavanje veličine turnira, selekcija na osnovu ponderisane sume vrednosti funkcija cilja i dodavanje šuma na funkcije cilja sa grubom granularnošću. Takođe bi bilo korisno ispitati performanse NSGA-II sa većim brojem generacija (nekoliko hiljada) ili verovatnoćom ukrštanja ispod 50%.

Konačno, kao još jedan potencijalni pravac istraživanja mogla bi se razmotriti primena drugih metaheurističkih metoda optimizacije, umesto NSGA-II, za rešavanje predmetnog problema. Pored drugih MOEA, od kojih su neki navedeni u [36] i [46], privlačno deluje nedavno predloženi metod *Multi-objective variable neighborhood search* (MO-VNS) [54] koji se pokazao boljim u poređenju sa NSGA-II za određene kombinatorne optimizacione probleme.

6 Zaključak

Tema ove studije bila je izbor, odnosno projektovanje ili podešavanje povorke impulsa u impulsnom Dopler radaru koji radi u LPRF režimu, sa MTD procesorom i poluprovodničkim predajnikom. Talasni oblik čijom primenom se mogu istovremeno prevazići problemi slepih zona i zamračivanja, prisutni u pomenutoj vrsti radara, nazvan je koherentna učešljana povorka impulsa sa višestrukim PRF, ili MPCIPB, što je akronim naziva prevedenog na engleski jezik.

Tehnički problem koji je proučavan u ovoj studiji jeste izbor MPCIPB tako da se istovremeno optimizuju, tj. maksimizuju tri cilja, odnosno kriterijuma: odnos signal-šum za objekte na instrumentalnoj daljini (koji utiče na maksimalnu daljinu otkrivanja objekata), Doplerova vidljivost (koja utiče na otkrivanje objekata u zonama izraženog klatera) i rezolucija po radijalnoj brzini (koja utiče na mogućnost razlučivanja objekata koji se preklapaju po daljini i azimutu). Da bi se ostvarila optimizacija navedenih ciljeva, korišćene su promenljive odlučivanja koje posredno ili neposredno u potpunosti definišu MPCIPB. Uslovi ili ograničenja koji su uzeti u obzir prilikom optimizacije obezbeđuju odsustvo zamračenih zona u celokupnom opsegu daljina koje su od interesa, minimalnu dozvoljenu vrednost prve prave slepe brzine, maksimalnu dozvoljenu vrednost faktora popune, itd.

Cilj studije je bio da se provere četiri hipoteze koje se odnose na predmetni tehnički problem. Odgovori koji su traženi u ovoj studiji, u vezi potvrđivanja ili opovrgavanja pomenutih hipoteza, nisu zavisili od nepoznatih osobina fizičkih procesa i sistema koji su predmet istraživanja, pa je bilo podjednako validno te odgovore tražiti pomoću eksperimenta ili simulacije. No, eksperimentalno ispitivanje navedenih hipoteza bilo bi veoma skupo, pa je u ovoj studiji izabrano da se do novog naučnog znanja dođe metodom simulacije. U odeljku 5.2 dokazano je da su sve četiri polazne hipoteze istinite, čime je u potpunosti ostvaren cilj studije.

Prema tome može se zaključiti sledeće:

- Postoje slučajevi gde za predmetni problem ne postoji jedinstveno optimalno rešenje, već skup PO rešenja;
- Postoje slučajevi gde za predmetni problem PF ima deo u kojem je moguće među ciljevima ostvariti trampu od praktičnog značaja, koja ne podrazumeva zanemarljivo poboljšanje jednog cilja na štetu značajnog pogoršanja drugih ciljeva prilikom prelaska iz jedne tačke PF u drugu;
- U okviru vektora promenljivih odlučivanja za predmetni problem, moguće je vektor PRI zameniti drugim promenljivama odlučivanja na takav način da kardinalnost vektora promenljivih odlučivanja ne zavisi od broja PRI N ;

- Postoji aproksimativan metod rešavanja predmetnog problema, koji daje rešenje blisko egzaktnom rešenju dobijenom metodom iscrpne pretrage, ali je skalabilniji i brži od iscrpne pretrage, u smislu potrebnog broja operacija poređenja za određivanje PO skupa rešenja.

Ključni naučni i stručni doprinosi ove studije sumirani su u produžetku.

- Napravljen je pregled postojeće literature u oblasti optimalnog izbora impulsne povorke LPRF i MPRF impulsnih Dopler radara. Pregled može biti od koristi istraživačima i inženjerima koji žele da se upoznaju sa tom oblašću.
- Definisan je matematički model predmetnog optimizacionog problema izbora MPCIPB, čija poslednja verzija je označena sa M19, zasnovan na poznatim teorijskim modelima iz raspoložive literature. Model M19 može biti od pomoći inženjerima koji projektuju MTD radarske sisteme, a može poslužiti i kao osnova ili primer za dalja istraživanja u pogledu unapređenja modela za problem izbora MPCIPB ili razvoja sličnih modela za druge vrste radarskih sistema.
- Razvijen je algoritam za aproksimativno određivanje POS za predmetni problem, nazvan NSGA-II+CES. Algoritam se zasniva na više uzastopnih izvršenja poznatog optimizacionog algoritma NSGA-II i kombinovanju njihovih rezultata iscrpnom pretragom za nedominiranim rešenjima unutar unije nedominiranih rešenja iz svih izvršenja NSGA-II. Ispitivanjem na matematičkom modelu M19, sa parametrima modela koji se odnose na hipotetički savremeni VHF radar, pokazalo se da je sa stanovišta tačnosti NSGA-II+CES efikasan optimizacioni algoritam za problem izbora MPCIPB, tj. daje dobru aproksimaciju POS. Na istom primeru, prema broju operacija poređenja potrebnih za određivanje POS, NSGA-II+CES je od iscrpne pretrage brži približno 2500 puta, što je razlika od preko 3 reda veličine. NSGA-II+CES je načelno skalabilniji od iscrpne pretrage, jer broj operacija poređenja u NSGA-II+CES ne zavisi od broja tačaka u dopustivom prostoru odlučivanja, dok u iscrpnoj pretrazi zavisi, pri čemu zavisnost ima oblik kvadratne funkcije.
- Napravljeni su pregled mogućnosti primene optimizacionog algoritma NSGA-II+CES sa matematičkim modelom M19 u praksi i analiza potencijalnih poboljšanja performansi radarskog sistema koje bi takva primena mogla da donese. NSGA-II+CES bi u praksi mogli koristiti projektanti radarskog sistema, te korisnici radarskog sistema tokom planiranja misije. Zahvaljujući relativno kratkom vremenu izvršavanja NSGA-II+CES na savremenim računarima, koje u zavisnosti od zahtevane tačnosti aproksimacije POS može biti reda veličine 10 ili 100 sekundi, postoji

potencijal da NSGA-II+CES koriste i operateri radarskog sistema tokom operativnog rada, za potrebe prilagođavanja MPCIPB promenama u režimu rada radara ili promenama u uslovima okoline. Primena NSGA-II+CES u praksi bi mogla dovesti do poboljšanja performansi radarskog sistema na više načina. Pre svega, ako radarski sistem radi u režimu određenom tačkom u POS, performanse sistema će načelno biti bolje u odnosu na režim rada koji odgovara tački dopustivog prostora odlučivanja koja nije PO. Sa poznatim POS unetim u računarski sistem radara, operater bi tokom operativnog rada mogao da menja MPCIPB prelaskom iz jedne u drugu tačku POS, u skladu sa potrebama situacije na terenu, što bi radar stavilo u prednost u odnosu na radare koji nemaju takvu mogućnost. Konačno, NSGA-II+CES ima potencijal za primenu u prilagođavanju MPCIPB promenama u režimu rada radara ili promenama u uslovima okoline u realnom vremenu, što je značajna kvalitativna odlika.

- Promovisana je primena višeciljne optimizacije u kontekstu rešavanja realnog inženjerskog problema. Ova studija bi mogla da motiviše druge inženjere i istraživače na primenu višeciljne optimizacije u rešavanju problema sa kojima se susreću.

Dok se prva četiri navedena doprinosa odnose na veoma usku oblast nauke i tehnike, peti doprinos ima mnogo širi značaj. Naime, mnogi inženjerski problemi iz stvarnog sveta, ako ne i većina, su u suštini problemi sa više suprotstavljenih ciljeva. Zato je možda najvažnija poruka ove studije inženjerima i istraživačima da ulože više vremena u upoznavanje sa konceptom višeciljne optimizacije i da istu aktivno primenjuju u rešavanju kardinalnih problema sa kojima se sreću prilikom projektovanja sistema.

Premda je ova studija ispunila svoje ciljeve, postoji širok prostor za dalje istraživanje u okviru teme koja je ovde otvorena. Mogući pravci daljeg istraživanja detaljno su opisani u odeljku 5.4, no ipak bi trebalo istaći one koji su od primarnog značaja. To je pre svega modifikacija matematičkog modela uvođenjem leksikografskog indeksa kao promenljive odlučivanja umesto promenljivih r^* i PRI_{min} , koja bi dovela do dodatnog smanjenja broja promenljivih odlučivanja, bez ograničavanja mogućih kombinacija PRI na način koji se a priori smatra optimalnim. Drugi veoma bitan pravac istraživanja odnosio bi se na ubrzavanje NSGA-II+CES. Jedan način da se to postigne je povećavanjem efikasnosti NSGA-II, primenom raznih modifikacija predloženih u literaturi, pa time i smanjenjem broja izvršenja NSGA-II N_R , ili čak eliminacijom potrebe za višestrukim izvršenjima NSGA-II. Alternativno, ako se ne može značajno smanjiti neophodan broj izvršenja NSGA-II, mogla bi se paralelizovati izvršenja imajući u vidu da su međusobno nezavisna, i time postići faktor ubrzanja ne veći od broja jezgara u centralnom procesoru.

Literatura

- [1] IEEE, *IEEE Standard Radar Definitions*, IEEE Std 686-1997, New York, NY: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998, ISBN 1-55937-958-8.
- [2] David K. Barton and Sergey A. Leonov, Eds., *Radar technology encyclopedia*, Norwood, MA: ARTECH HOUSE, 1998, ISBN 0-89006-893-3.
- [3] Merrill I. Skolnik, Ed., *Radar Handbook*, Third Edition, The McGraw-Hill Companies, 2008, ISBN 978-0-07-148547-0.
- [4] Mark A. Richards, James A. Scheer, and William A. Holm, Eds., *Principles of Modern Radar, Vol I: Basic principles*, Edison, NJ: SciTech Publishing, 2010, ISBN 978-1-891121-52-4.
- [5] D. C. Schlecher, *MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB®*, Second Edition, Norwood, MA: ARTECH HOUSE, 2010, ISBN 978-1-59693-414-6.
- [6] A.W. Rihaczek, "Choice of Burst Number For Blind-Speed Avoidance," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 9, (5), pp. 778-781, 1973.
- [7] G.W. Stimson, H.D. Griffiths, C.J. Baker, and D. Adamy, *Stimson's Introduction to Airborne Radar*, Third edition, Edison, NJ: SciTech Publishing, 2014, ISBN 978-1-61353-022-1.
- [8] V.K. Madisetti and D.B. Williams, Eds., *Digital Signal Processing Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, ISBN 0-8493-8572-5.
- [9] R.T. Marler, J.S. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26, (6), pp. 369–395, 2004.
- [10] F. Guala, "Models, Simulations, and Experiments," in *Model-Based Reasoning*, L. Magnani, N.J. Nersessian, Eds. Boston, MA: Springer, 2002, https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0605-8_4.
- [11] Emily C. Parke, "Experiments, Simulations, and Epistemic Privilege," *Philosophy of Science*, vol. 81, no. 4, pp. 516-36, 2014, DOI:10.1086/677956.
- [12] S. Roush, "The epistemic superiority of experiment to simulation," *Synthese*, 195, pp. 4883-4906, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11229-017-1431-y>.
- [13] A.W. Rihaczek, "A Systematic Approach to Blind-Speed Elimination," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 9, (6), pp. 940-947, 1973.
- [14] A.D. Stocker, "Dwelltime Minimization for Radar Target Detection in the Clear," *IEEE Trans. AES*, 23, (1), pp. 130-138, 1987.

- [15] P. Sedivy, "Radar PRF staggering and agility control maximizing overall blind speed," In Proc. 13th Conference on Microwave Techniques COMITE 2013, Pardubice, Czech Republic, April 2013, pp. 197-200.
- [16] J. Simpson, "PRF set selection for pulse-Doppler radars," In Proc IEEE Region 5 Conference, 1988: 'Spanning the Peaks of Electrotechnology', Colorado Springs, CO, USA, 1988, pp. 38-44, DOI: 10.1109/REG5.1988.15896.
- [17] P. G. Davies, E. J. Hughes, "Medium PRF set selection using evolutionary algorithms," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 38, (3), pp. 933–939, 2002.
- [18] C. M. Alabaster, E. J. Hughes, J. H. Matthew, "Medium PRF radar PRF selection using evolutionary algorithms," *IEEE Trans. AES*, 39, (3), pp. 990–1001, 2003.
- [19] D. Wiley, S. Parry, C. Alabaster, et al., "Performance comparison of PRF schedules for medium PRF radar," *IEEE Trans. AES*, 42, (2), pp. 601–611, 2006.
- [20] E. J. Hughes, "Radar Waveform Optimisation as a Many-Objective Application Benchmark," In Proc. 4th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization EMO'07, Matsushima, Japan, March 2007, pp. 700–714.
- [21] M. Milojević Jevrić, „The application of meta-heuristics to optimise load distribution in machine elements and assemblies,” Doctoral thesis, Faculty of technical sciences, Novi Sad, 2015.
- [22] Bernhard Korte and Jens Vygen, *Combinatorial Optimization - Theory and Algorithms*, 4th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, e-ISBN 978-3-540-71844-4.
- [23] Matthias Ehrgott, *Multicriteria Optimization*, 2nd ed., Springer Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-21398-8.
- [24] Kaisa Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic Publishers, 1998, ISBN 978-0-7923-8278-2.
- [25] Melanie Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Massachusetts Institute of Technology, 1996, ISBN 0-262-13316-4.
- [26] Y. Ning, X. Bai, F. Zhou, et al., "Method for inverse synthetic aperture radar imaging of space debris using improved genetic algorithm," *IET Radar Sonar Navig.*, 11, (5), pp. 812-821, 2017.
- [27] J. Wang, F. Zhou, M. Tao, et al., "System parameter optimisation for moving target detection and imaging in multi-band synthetic aperture radar based on genetic algorithm," *IET Radar Sonar Navig.*, 10, (1), pp. 146-154, 2016.

- [28] C. Winsor, E.J. Hughes, "Optimisation and evaluation of receiver search strategies for electronic support," *IET Radar Sonar Navig.*, 6, (4), pp. 233-240, 2012.
- [29] Jurgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen, Roman Słowiński, Eds., *Multiobjective Optimization - Interactive and Evolutionary Approaches*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2008, ISBN-13 978-3-540-88907-6.
- [30] Abdullah Konak, David W. Coit, Alice E. Smith: "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," *Reliability Engineering & System Safety*, 91, (9), pp. 992-1007, Sept. 2006, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.018>.
- [31] A. Zhou, B.Y. Qu, H. Li, et al., "Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art," *Swarm and Evolutionary Computation*, 1, (1), pp. 32-49, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.03.001>.
- [32] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, et al., "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 6, (2), pp. 182–197, 2002.
- [33] Q. Han, M. Pan, S. Gong, et al., "Resource management of opportunistic digital array radar antenna aperture for pattern synthesis," *IET Radar Sonar Navig.*, 11, (5), pp. 829-837, 2017.
- [34] R. Kassab, "Design of LPI waveforms for monostatic radar," Ph.D. thesis, University Pierre et Marie Curie Paris VI, 2009.
- [35] H. Ishibuchi, K. Narukawa, Y. Nojima, "Handling of Overlapping Objective Vectors in Evolutionary Multiobjective Optimization," *International Journal of Computational Intelligence Research*, 1, (1), pp. 1-18, 2005.
- [36] Y. Zhu, J. Xie, J. Zheng, et al., "Research on Overlapping Individuals in MOEAs: Causation, Probability for Quantity and Influence on Assessment," In Proc. Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery FSKD'09, Tianjin, China, August 2009, pp. 14-19.
- [37] T. Davidović, Matematički Kolokvijum: „Problemi i metode optimizacije,“ Matematički institut SANU, Odeljenje za matematiku, 25. novembar 2016.
- [38] Jevtić, M., Zogović, N., Graovac, S., „Multiobjective Approach to Optimal Waveform Design for Solid-state VHF Pulse-Doppler Air Surveillance Radar,“ In Proc. 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2015, Silver Lake, Serbia, June 2015, pp AUI2.3.1–6.

- [39] Jevtić, M., Zogović, N., Graovac, S., “Optimal Pulse-Doppler Waveform Design for VHF Solid-State Air Surveillance Radar,” in *Operations Research Proceedings 2015*, Dörner, K.F. et al., Eds., Springer International Publishing Switzerland, 2017, pp. 309-315.
- [40] Jevtić, M.; Zogović, N.; Graovac, S., „Evolutionary multi-objective optimisation of the pulse burst waveform in solid-state VHF moving target detection radar,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, 13, (12), pp. 2093-2101, 2019, DOI: 10.1049/iet-rsn.2019.0033.
- [41] Sen, S.K., Ali Shaykhian, G., “Exhaustive versus randomized searches for nonlinear optimization in 21st century computing: solar application,” *Neural, Parallel & Scientific Computations*, 18, (3-4), pp. 487-498, 2010.
- [42] Graham, R.L., Knuth, D.E., Patashnik, O., *Concrete Mathematics - A foundation for computer science*, 2nd ed., Reading, MA: Addison-Wesley Professional, 1994.
- [43] Barton, D.K., *Radar System Analysis and Modeling*, Norwood, MA: ARTECH HOUSE, 2005, ISBN: 978-1-58053-681-3.
- [44] Barton, D.K., *Radar Equations for Modern Radar*, Norwood, MA: ARTECH HOUSE, 2013, ISBN: 978-1-60807-521-8.
- [45] Bojan, Šmidling, and Zogović Nikola, “Genetic algorithm as energy optimization method in WSN,” In Proc 2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2013, pp. 97-100, DOI: 10.1109/TELFOR.2013.6716181.
- [46] Ishibuchi, H., Yamane, M., Nojima, Y. , “Effects of Discrete Objective Functions with Different Granularities on the Search Behavior of EMO Algorithms,” In Proc. GECCO’12, Philadelphia, Pennsylvania, USA, July 7-11, 2012, pp. 481-488.
- [47] Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, “Software Developed at KanGAL,” [Online]. Available: <https://www.iitk.ac.in/kangal/codes.shtml>, [Accessed: March 7, 2021].
- [48] Jevtić, M., Timčenko, V., Zogović, N., Đorđević, B., „On The Use Of k-(Multi)Combination Decision Variables in Engineering Optimization Problems,“ in *Book of Abstracts of the XIII Balkan Conference on Operational Research BALCOR 2018*, Martić, M., Savić, G., Kuzmanović, M., Eds., Belgrade, 25-28 May, 2018, pp.7, ISBN: 978-86-80593-65-4.
- [49] Jevtić, M., Zogović, N., Graovac, S., „Lexicographical Index Decision Variable in Pulse-Doppler Radar Pulse Burst Waveform Optimization,” in *ICIST 2020 Proceedings*, Zdravković, M., Konjović, Z., Trajanović, M., Eds., 2020, pp.266-270.

- [50] B. P. Buckles and M. Lybanon, "Algorithm 515: Generation of a Vector from the Lexicographical Index [G6]," *ACM Trans. Math. Softw.*, 3, (2), pp. 180–182, June 1977, DOI: <https://doi.org/10.1145/355732.355739>.
- [51] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C. M. Fonseca, and V. G. da Fonseca, "Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 7, no. 2, pp. 117–132, Apr. 2003.
- [52] Zogović, Nikola, "Energy Efficiency Versus Reliability Tradeoff Improvement in Low-Power Wireless Communications," *IEEE Systems Journal*, 14, (3), pp. 3173-3184, Sept. 2020, DOI: 10.1109/JSYST.2020.2967541.
- [53] Efron, B., *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982, ISBN: 978-0-898711-79-0.
- [54] Duarte, A., Pantrigo, J. J., Pardo, E. G., Mladenovic, N., "Multi-objective variable neighborhood search: an application to combinatorial optimization problems," *Journal of Global Optimization*, 63, (3), pp. 515-536, 2015.

Biografija autora

Miloš Jevtić je rođen 1976. godine u Kragujevcu, Srbija. Gimnaziju je završio u Kragujevcu 1995. godine, a na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu diplomirao je 2003. godine, na smeru za Elektroniku.

Od 2003. godine zaposlen je u preduzeću „IMP – Računarski sistemi d.o.o.“, a kasnije u „Institutu Mihajlo Pupin d.o.o.“ (IMP). Učestvovao je na projektima: „Rekonstrukcija Automatizovanog radio tehničkog izviđačkog sistema – ARTIS“, „Softverska biblioteka za demodulaciju i dekodovanje PACTOR-2 protokola“, „Sistem za elektronsku kontrolu ulaska/izlaska vozila na teretni carinski terminal“, „Računarska mreža za obradu podataka radarske stanice – RMRSt“, „Modernizacija osmatračko-akvizicijskog radara P-12“, „Mobilni centar vazdušnog osmatranja i javljanja – MCVOJ“, „TR32051 – Razvoj i realizacija naredne generacije sistema, uređaja i softvera na bazi softverskog radija za radio i radarske mreže“, „Modernizacioni komplet za radar S-600 (EARS-S600-K)“, „Softverski definisani radio“, „Razvoj primopredajnog dela radara“, „Izrada prototipa poluprovodničkog radarskog predajnika“ i „Izrada softvera za prototip radio-goniometra“. Za rezultate postignute na projektu „Modernizacija osmatračko-akvizicijskog radara P-12“, nagrađen je od strane IMP, 2011. godine.

Osnovne oblasti istraživanja i razvoja kojima se autor bavio su: distribuirani računarski sistemi, paralelno programiranje, bežične senzorske mreže, akvizicija, obrada, prenos i vizualizacija radio i radarskih signala u realnom vremenu, praćenje pokretnih ciljeva, objedinjavanje podataka sa više senzora, softverski definisan radio/radar i višeciljna optimizacija.

Autor je objavio 25 naučnih radova, uključujući jedan rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22). Član je IEEE Aerospace and Electronic Systems Society.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Милош Јевтић

Број индекса 2012/5048

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Вишециљна оптимизација импулсне поворке у полупроводничком импулсном Доплер радару“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 18. 3. 2021.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милош Јевтић

Број индекса 2012/5048

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада „Вишециљна оптимизација импулсне поворке у полупроводничком импулсном Доплер радару“

Ментор др Бранко Ковачевић, професор емеритус

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 18.3.2021.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Вишециљна оптимизација импулсне поворке у полупроводничком импулсном Доплер радару“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 18.3.2021.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.