

ПОБОЉШАЊЕ РЕЗОЛУЦИЈЕ ПО ДАЉИНИ КЛАСИЧНИХ РАДАРА ПРИМЕНОМ НАДОДАБИРАЊА И МОДИФИКОВАНОГ MUSIC АЛГОРИТМА

Слободан Симић, Бојан Зрнић, Војна Академија – Одсек логистике, Р. Песановића 1, Београд,
Алекса Зејак, ИМТЕЛ Институт, Бул. М. Пупина 165-В, Београд, zejak@insimtel.com

Садржај: У овом раду предложен је метод за побољшање резолуције по даљини класичног импулсног радара. Метод се заснива на поступку надодабирања рефлектованог сигнала и процени корелационе матрице суседних ехо импулса. За формирање функција чији локални максимуми одговарају позицијама циљева користе се модификована варијанта MUSIC алгоритма. У раду је анализиран утицај односа сигнал/шум на перформансе предложеног метода.

1. УВОД

Оптимално филтрирање у радарском пријемнику подразумева “прилагођење” пријемника корисном сигналу. Корисни сигнал је сигнал који се жели примити и он је у већини случајева идентичан или врло сличан емитованом сигналу. То је случај када се у једној резолуционој ћелији нађе један циљ: рефлектовани сигнал је ВФ импулс једнаког трајања као и емитовани. Фреквенција му је различита услед кретања циља, али то нема утицаја ако се пре прилагођеног филтрирања или паралелно са њим изврши Доплерова обрада. Међутим, ако се у резолуционој ћелији нађе више просторно дистрибуираних циљева или један циљ чије су димензије реда величине као и сама резолуциона ћелија и који има више субрефлектора, сигнал који се рефлектује од оваквих циљева на улаз радарског пријемника (корисни сигнал), биће смеша појединачних одраза, закашњених за интервале мање од трајања импулса, сразмерно даљини одговарајућег рефлектора (циља). Сада се корисни сигнал битно разликује од емитованог, јер просторно распоређена група рефлектора у једној резолуционој ћелији, у ствари врши модулацију (амплитудно-фреквенцијско-фазну) радарског импулса и пријемник прилагођен емитованом сигналу није прилагођен корисном сигналу.

Познато је да прилагођени филтар максимизује однос сигнал/шум на свом излазу, те је оптималан са становишта одлучивања да ли у резолуционој ћелији постоји или не постоји циљ. Међутим, прилагођени пријемник за прост, немодулисани, радарски импулс не може да раздвоји два појединачна одраза ако су они међусобно закашњени за време мање од трајања импулса тј. резолуција по даљини је, у овом случају, одређена трајањем емитованог импулса.

Пошто је информација о кашњењима појединачних одраза садржана у долазећем сигналу (амплитуда и тренутна фреквенција), а како се приликом конвертовања сигнала из ВФ у МФ опсег мења само фреквенција носиоца, то је ова информација сачувана и у МФ сигналу. Даља обрада у радарском пријемнику подразумева формирање видео импулса, где се губи део информације о кашњењима појединачних одраза садржан у тренутној фреквенцији, али остаје сачуван део садржан у промени амплитуде.

Идеју за концепт издвајања ове информације даје рад [1], у којем је предложен метод за разлагање радарског циља на субрефлекторе. У том раду је анализирана могућност примене метода на конкретан радарски сигнал са трајањем импулса T (реда наносекунди) и периодом понављања импулса PRI , реда стотина μs . Брзина процеса онемогућава одабирање у складу са Најквистовим критеријом, па је примењен концепт пододабирања (*subsampling*) са периодом $T_s = PRI + \tau$, где је $\tau = T/N$, временски интервал мањи од трајања импулса N пута. Фактички, користи се N импулса да би се, са N одбирака реконструисао један. При томе се резолуција побољша N пута.

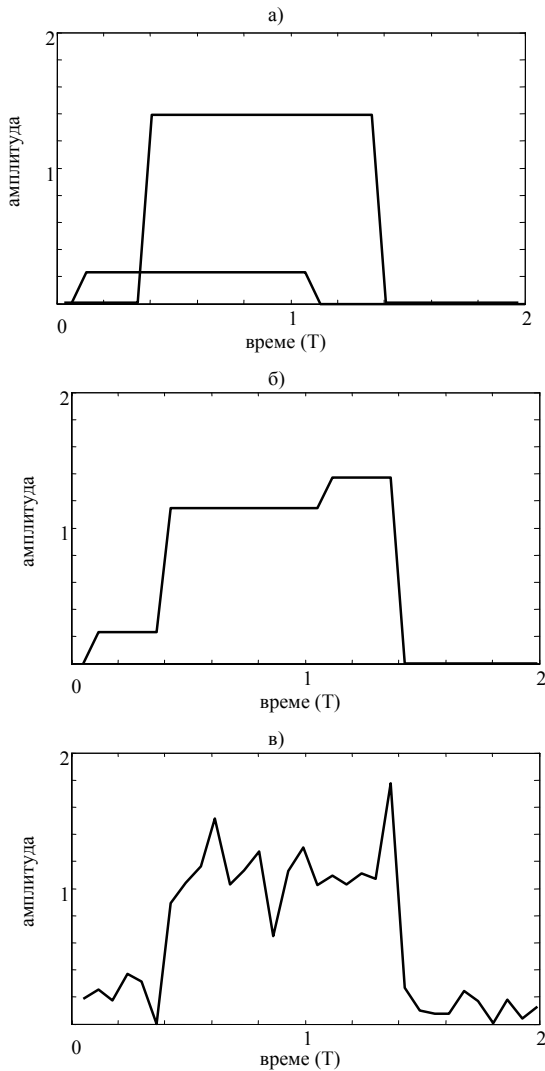
Идеја овог рада је да се одабира МФ сигнал у радарском пријемнику, са периодом T/N (*oversampling*), што је могуће код осматрачких радара где је T реда микросекунди. Тако добијен дискретни сигнал садржи целокупну количину информација о кашњењима појединачних одраза. одабирањем видео импулса добија се дискретни сигнал у којем је сачуван један део ове информације, садржан у амплитуди. У овом раду је анализиран први случај.

2. КОНЦЕПТ НАДОДАБИРАЊА РАДАРСКОГ СИГНАЛА

Примљени радарски сигнал из једне резолуционе ћелије, на излазу МФ дела пријемника, а пре детектора анвелопе, може се моделовати на следећи начин:

$$r(t) = \sum_{i=1}^M \alpha_i s_i(t - \tau_i) + n(t), \quad (1)$$

где је M број рефлектора у наведеном бину даљине, $s(t)$ је емитовани радарски импулс који се рефлектује од сваког рефлектора и враћа закашњен за интервал τ_i сразмерно удаљености рефлектора од радара и промењене амплитуде, фреквенције и фазе, промена амплитуде и фазе је садржана у комплексној случајној променљиви $\alpha_i = |\alpha_i| e^{j\varphi_i}$ која је пропорционална са коефицијентом рефлексије i -тог рефлектора. Фаза ове случајне променљиве је равномерно расподељена, а модуло по Рејлијевом закону расподеле вероватноће. Са $n(t)$ је означен клатер, који се у раду моделује као комплексни бели Гаусов шум. Промена фреквенције је садржана у сигналу $s_i(t)$, који је комплексна синусоида трајања T и учестаности ω_i која зависи од брзине између рефлектора и радара. Ако претпоставимо да је извршена Доплерова обрада, односно одређивање Доплерове учестаности ω_{di} збирног радарског одраза (која представља средњу вредност Доплерових учестаности појединачних одраза, ω_{di}) и множење МФ сигнала синусоидом учестаности $\omega_m - \omega_{di}$, онда су учестаности $\omega_i = |\omega_{di} - \omega_{di}|$.



Слика 1. Формирање радарског одраза од два рефлектора, а) модули појединачних одраза, б) модулу резултујућег одраза, в) утицај адитивног белог шума

На слици 1. је приказано формирање одраза од два рефлектора из једног бина даљине $[0, T]$. У односу на почетак бина ($t=0$) појединачни одрази су закашњени за $2T/16$ и $7T/16$, слика 1.а. На слици је приказан и део временске осе који одговара наредном бину даљине $[T, 2T]$, јер се ту завршавају наведени одрази. Од међусобног односа случајних фаза φ_1 и φ_2 зависи да ли ће се амплитуда резултујућег одраза повећати или смањити у односу на појединачне, слика 1.б. На слици 1.в види се утицај шума при односу сигнал/шум од 10 dB.

Класична обрада предвиђа одабирање са периодом једнаким трајању импулса, груписање одбирака импулса из истог бина даљине (пакет импулса) и њихову даљу обраду. Оваквим одабирањем губи се информација о појединачним рефлекторима, а да би се сачувала потребно је извршити надодабирање [2]. Један начин издвајања информације о кашњењима појединачних одраза базиран на процени корелационе матрице и примени модификованог MUSIC метода, дат је у поглављу које следи.

3. МЕТОД ЗА ПРОЦЕНУ КАШЊЕЊА ПОЈЕДИНАЧНИХ ОДРАЗА

Да би проценили кашњења сигнала од појединачних рефлектора, потребно је да израчунамо корелациону матрицу од парова суседних ехо импулса који одговарају два суседним резолуционим ћелијама. Корелациону матрицу \mathbf{R} процењујемо следећим усредњавањем:

$$\mathbf{R} = \sum_{j=0}^{K-1} \mathbf{r}_j \times \mathbf{r}_j^H, \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_j = [r_{j,1} \ r_{j,2} \ \dots \ r_{j,2N}]^T, \quad (3)$$

$$r_{j,k} = r(j \cdot PRI + k \cdot T/N), \quad k \in [1, 2N], \quad (4)$$

где је K број импулса у пакету, N фактор надодабирања, PRI период понављања импулса, а \mathbf{r}_j вектор који садржи $2N$ одбирака, N од j -тог импулса у пакету и N од њему суседног импулса.

Својствене вредности корелационе матрице λ_i , поређане опадајућим редоследом, садрже информацију о броју рефлектора у бину даљине и могу се искористити за раздвајање подпростора сигнала, \mathbf{P}_s , од подпростора шума \mathbf{P}_n (нпр. помоћу Akaike информационог критеријума одреди се број M , где M највећих својствених вредности одређује \mathbf{P}_s , а осталих $2N-M$ одређују \mathbf{P}_n). Њима одговарајући својствени вектори, \mathbf{v}_i могу послужити за формирање функције која ће имати локалне максимуме у тренуцима који одговарају кашњењима појединачних одраза [1]. Један начин формирања ове функције $F(\tau)$ је пројекција детерминистичких вектора сигнала на подпростор шума (MUSIC) и усредњавање по фреквенцији које је неопходно ако се рефлектори крећу различитим брзинама:

$$F(\tau) = \sum_{\omega} \frac{\sum_{i=1}^M |s_{\tau,\omega}^* \cdot \mathbf{v}_i|^2}{\sum_{i=M+1}^{2N} |s_{\tau,\omega}^* \cdot \mathbf{v}_i|^2}, \quad \tau \in [0, N-1], \quad (5)$$

$$\mathbf{s}_{\tau,\omega} = [s_{\tau,\omega}^1 \ s_{\tau,\omega}^2 \ \dots \ s_{\tau,\omega}^{2N}]^T, \quad (6)$$

$$s_{\tau,\omega}^k = \Pi_N(\tau - k) \cdot e^{j \frac{2\pi}{N} \omega k}, \quad k \in [1, 2N], \quad (7)$$

при чему је Π_N дискретна правоугаона прозорска функција дужине N , за разлику од класичног MUSIC метода [3] где немамо временско “шетање” прозора. Учестаности ω су дискретне, нормализоване и потребно их је изабрати тако да покрију опсег очекиваних брзина. Што је већа густина којом се покрије поменути опсег, то је тачност процене τ_i боља, али је и нумеричка сложеност већа.

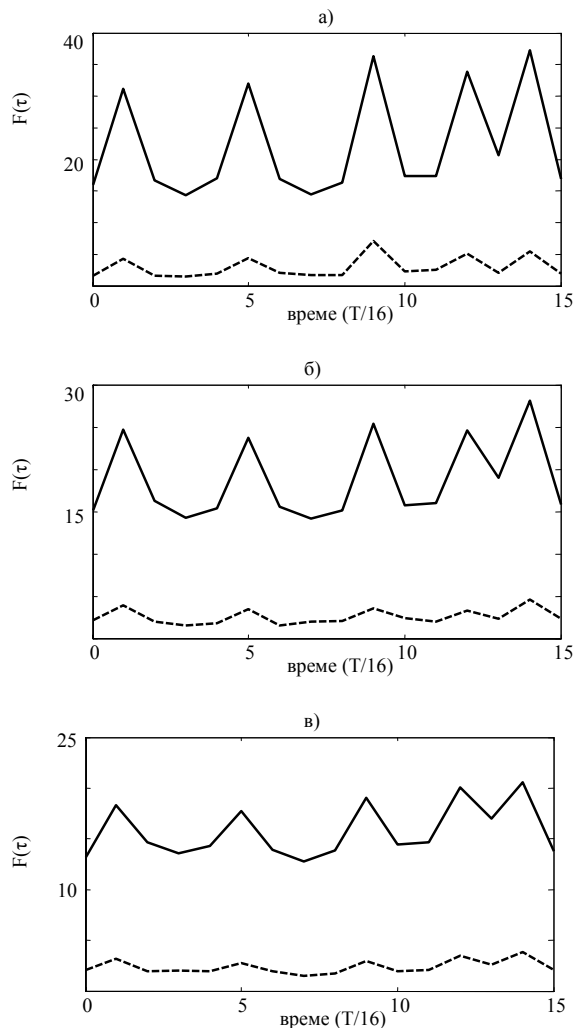
4. РЕЗУЛТАТ СИМУЛАЦИЈЕ

Предпоставке под којима је извршена симулација су следеће:

- ✓ Коришћено је 10 импулса
- ✓ Фактор надодабирања је $N=16$
- ✓ Периода понављања импулса је $PRI=0.5$ ms

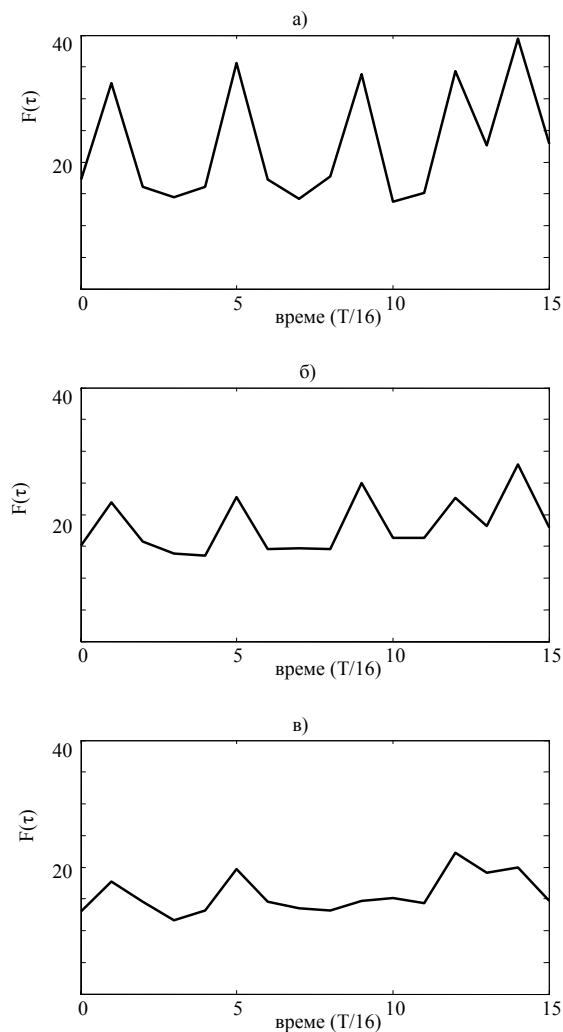
- ✓ Дискретне учестаности појединачних одраза су из опсега $[0,0.01]$, (што одговара опсегу брзина $[v_{sr}-300m/s, v_{sr}+300m/s]$ за радар са параметрима $T=5\mu s$ (резолюција по даљини $\Delta R=750 m$), $f_0=16 GHz$, а v_{sr} је средња брзина која је естимирана Доплеровом обрадом), а усредњавање (5) на овом опсегу је извршено са кораком $0.001 (30 m/s)$.
- ✓ Рефлектори се нису померили из нових резолуционих ћелија (нова резолуција по даљини $\Delta R_N=\Delta R/N$ је за предходни пример радара једнака $47 m$), а време пријема 10 импулса је $t_p=10PRI=5 ms$, што значи да би циљ изашао из нове резолуционе ћелије требао би да се креће брзином $v=\Delta R_N / t_p=47/0.005=9400 m/s$ што је нереално).

На слици 2. приказана је функција $F(\tau)$ у случају присуства 5 рефлектора на различитим растојањима од радара у једном бину даљине. Задата кашњења су $T/16, 5T/16, 9T/16, 12T/16$ и $14T/16$, а нормализоване фреквенције придружене датим кашњењима су $10^{-3}, 10^{-3}, 2.7 \cdot 10^{-3}, 1.6 \cdot 10^{-3}, 9.5 \cdot 10^{-3}$. Посматрано је по 50 реализација метода за $SNR=10 dB$ (слика 2.а), $SNR=5 dB$ (слика 2.б) и $SNR=0 dB$ (слика 2.в).



Слика 2. Процена позиције појединих рефлектора, усредњено са 50 реализација, а) при $SNR=10 dB$, б) при $SNR=5 dB$, в) при $SNR=0 dB$,

Пуном линијом обележена је средња вредност а испрекиданом стандардна девијација. Са слике се види да се стандардна девијација и минимуми усредњене функције $F(\tau)$ не мењају значајно са променом односа сигнал/шум. Значајну промену испољавају максимуми, који су као што се види у тренуцима који одговарају кашњењима одраза појединих рефлектора а самим тим и њиховим растојањима. У прва два случаја, стандардна девијација је мања од разлике између максимума и минимума, док је у трећем случају приближно једнака, што значи да је ово и гранични случај детекције. Ово је илустративније ако се погледа једна реализација сваког од ових случајева. То је приказано на слици 3. Са ове слике се јасно види зашто је $SNR=0 dB$ гранични случај детекције. У овом случају могу се издвојити 4 рефлектора, док је пети маскиран. У прва два случаја јасно се издваја свих пет рефлектора.



Слика 3. Процена позиције појединих рефлектора, једна реализација а) при $SNR=10 dB$, б) при $SNR=5 dB$, в) при $SNR=0 dB$,

5. ЗАКЉУЧАК

Оваквим начином обраде пакета импулса могуће је поправити резолуцију N пута, где је N фактор надодабирања. Горње ограничење представља брзина циља, али још више појава тзв. “цitera” или

подрхтавања почетака импулса у пакету, услед несавршености електронских кола. Наиме чим би ово подрхтавање било са вероватноћом 0.5 веће од T/N , даље повећање N не би имало смисла. Број импулса за успешну реализацију метода је мали, реда десетина.

Даље истраживање ишло би у правцу примене метода на видео импулсе (после детектора анвелопе). Ово је значајно са становишта практичне примене метода, јер је лакше реализовати аквизицију видеоимпулса него аквизицију МФ кохерентних импулса. Важно би било анализирати утицај клатерских шума који немају Гаусовски карактер.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D.Grenier, E.Pigeon and R.M.Turner, "High-Range Resolution Mono-Frequency Pulsed Radar for the Identification of Approaching Targets Using Subsampling and the MUSIC Algorithm", *IEEE Sig Proc. Letters*, Vol.3, No.6, June 1996
- [2] И.С.Симић, А.Ј.Зејак "Постизање вишеструке резолуције по даљини у радарима без

унутаримпулсне модулације", *Зборник радова, ЕТРАН 2003*

- [3] R.O.Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop*, Oct. 1979

Abstract: In this paper the method for radar range resolution improvement is proposed. The method is based on oversampling of radar signal and the MUSIC algorithm. The impact of the signal to noise ratio on the proposed method performance is analyzed.

THE RADAR RANGE RESOLUTION IMPROVEMENT BASED ON OVERSAMPLING AND MUSIC ALGORITHM

Slobodan Simić, Bojan Zrnić,
Aleksa Zejak