



Wpływ dyskretyzacji na parametry sygnału radarowego po kompresji

CZESŁAW LEŚNIK, ADAM KAWALEC, JERZY PIETRASIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono istotę zjawiska wywołanego dyskretyzacją radarowego sygnału złożonego. Dokonano próby jakościowej oraz ilościowej oceny wpływu tego zjawiska na parametry sygnału radarowego po kompresji. Do rozważań przyjęto sygnał z liniową modulacją częstotliwości (LMCz). Badanymi parametrami sygnału były: względny poziom maksymalnego listka bocznego (*PSL*) oraz straty sygnału użytecznego wywołane niedopasowaniem (*LPG*). Rozważania zilustrowano przykładowymi wynikami badań symulacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano próby sformułowania wniosków praktycznych.

Słowa kluczowe: radar, kompresja impulsu, LMCz, zjawisko Dopplera, cyfrowy filtr kompresji
Symbole UKD: 621.396.96.08

1. Wprowadzenie

Rozwiązaniem podstawowego w teorii radiolokacji problemu optymalnej (w sensie maksymalizacji stosunku sygnału do szumu) filtracji liniowej jest tzw. filtr dopasowany. Zespolona transmitancja filtra dopasowanego jest proporcjonalna do sprzężonego widma sygnału, do którego dopasowany jest filtr [1].

Czasową postać sygnału na wyjściu filtra dopasowanego, w funkcji dopplerskiego przesunięcia częstotliwości, wyznacza się, wychodząc z ogólnej, wprowadzonej przez Woodwarda, definicji radarowej funkcji nieoznaczoności

$$\chi(\tau, f_D) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t-\tau)e^{j2\pi f_D t} dt, \quad (1)$$

gdzie: $u(t)$ — zespolona obwiednia sygnału; $u^*(t)$ — wielkość sprzężona do $u(t)$; f_D — dopplerowskie przesunięcie częstotliwości; τ — względne przesunięcie czasu (względem momentu pojawienia się maksimum sygnału wyjściowego).

Do dalszych rozważań najczęściej wykorzystywany jest moduł funkcji nieoznaczoności $|\chi(\tau, f_D)|$.

Najbardziej popularnym rodzajem radarowego impulsowego sygnału sondującego jest sygnał z liniową modulacją częstotliwości (LMCz). Jego rzeczywistą postać czasową, przy założeniu normalizacji energii sygnału do jedności, przedstawia wyrażenie [2]

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\mu t^2}{2} + \varphi_0\right), \quad (2)$$

gdzie: T — czas trwania impulsu; ω_0 — pulsacja środkowa (nośna); μ — nachylenie funkcji modulacji pulsacji $\mu = \pm \frac{2\pi B}{T}$ [rad/s²]; B — zakres zmian częstotliwości wewnątrz impulsu (dewiacja częstotliwości); φ_0 — faza początkowa; $\operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ — jednostkowy impuls prostokątny, zdefiniowany następująco:

$$\operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1 & \text{dla } -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{dla pozostałych } t. \end{cases}$$

Istotnym parametrem rozważanego sygnału złożonego jest jego baza, określona zależnością $K = BT$.

Zespolona obwiednia sygnału (2) przyjmuje postać

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\frac{\mu t^2}{2}}. \quad (3)$$

Z wyrażenia (1) i (3) można wyznaczyć moduł funkcji nieoznaczoności rozważanego sygnału

$$|\chi(\tau, f_D)| = \operatorname{rect}\left(\frac{\tau}{2T}\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \operatorname{Sa}\left[\left(2\pi f_D + \mu\tau\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{T}{2}\right], \quad (4)$$

gdzie

$$\operatorname{Sa}(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x} & \text{dla } x \neq 0 \\ 1 & \text{dla } x = 0. \end{cases}$$

Z wyrażenia (4) wynika, że maksimum sygnału na wyjściu filtru dopasowanego zmienia swoje położenie na osi czasu w funkcji wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości z jednoczesną modulacją wartości tego maksimum funkcją $(1 - |\tau|/T)$.

Do podstawowych, powszechnie używanych, charakterystyk sygnału na wyjściu filtru dopasowanego należą następujące parametry:

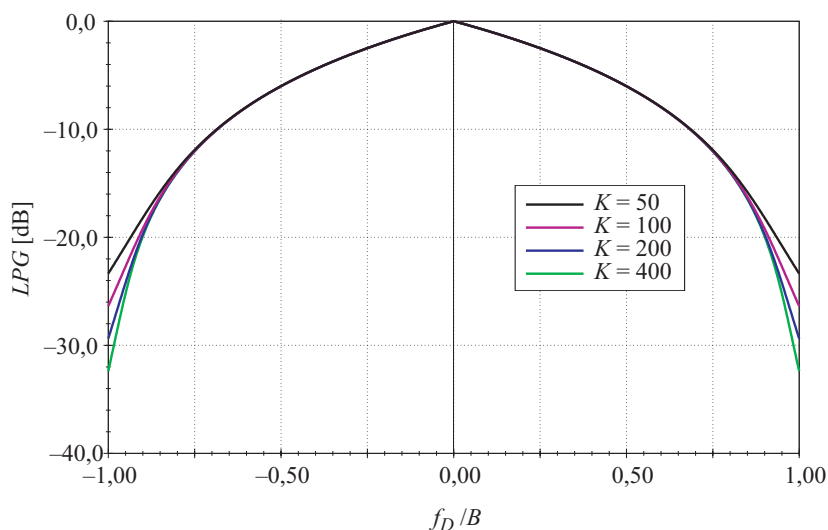
- *LPG* (ang. *Loss in Process Gain*), poziom listka głównego przy braku dopasowania U_{LG} odniesiony do jego maksymalnej wartości w przypadku idealnego dopasowania U_{LGmx}

$$LPG = 20 \log \frac{|U_{LG}|}{|U_{LGmx}|}, \quad (5)$$

- *PSL* (ang. *Peak Sidelobe Level*), względny poziom maksymalnego listka bocznego U_{LB} odniesiony do maksimum listka głównego U_{LG}

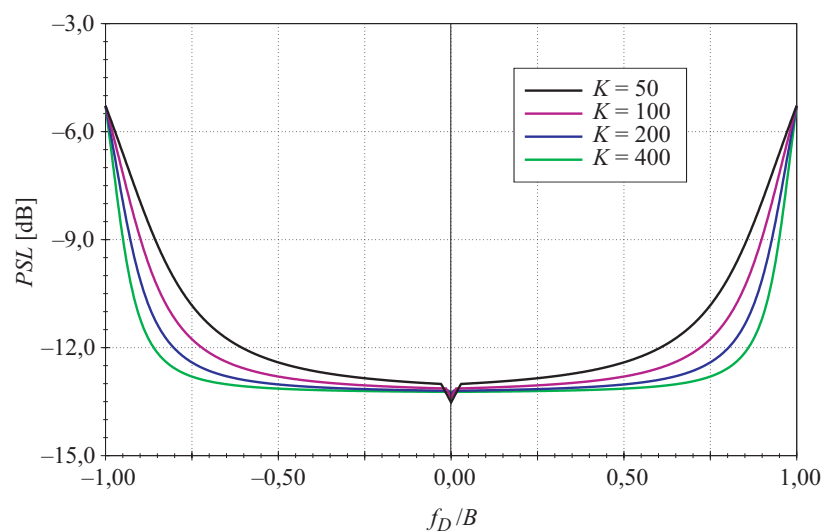
$$PSL = 20 \log \frac{|U_{LB}|}{|U_{LG}|}. \quad (6)$$

Na podstawie teoretycznych zależności (4) oraz (5) wyznaczono przebieg parametru *LPG* sygnału z modulacją LMCz w funkcji dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Dopplerowskie przesunięcie częstotliwości zostało unormowane do szerokości widma sygnału. Wyniki obliczeń, dla różnych wartości bazy sygnału, przedstawiono na rysunku 1.

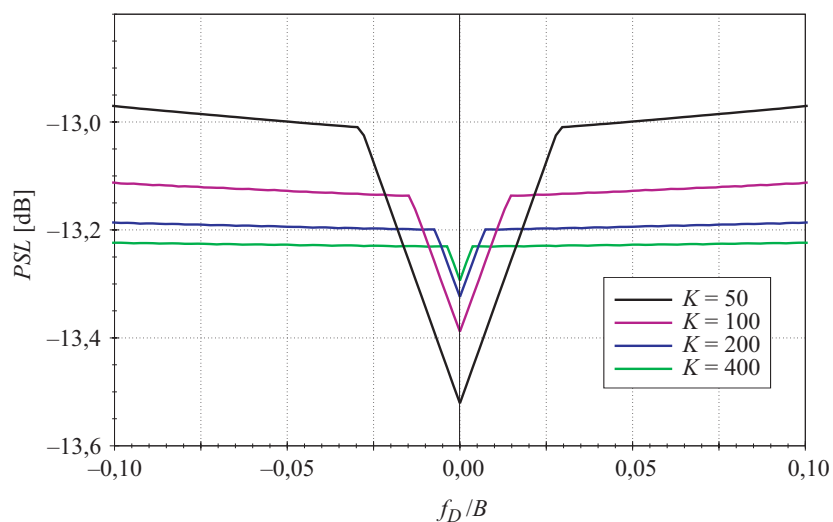


Rys. 1. Zależność parametru *LPG* od względnej wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości

Wyniki analogicznych obliczeń dla parametru PSL przedstawiono na rysunku 2. Zmiany wartości parametru PSL w funkcji względnego dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości, ograniczonego do najmniejszych jego wartości, przedstawia w powiększeniu rysunek 3.



Rys. 2. Zależność parametru PSL od względnej wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości

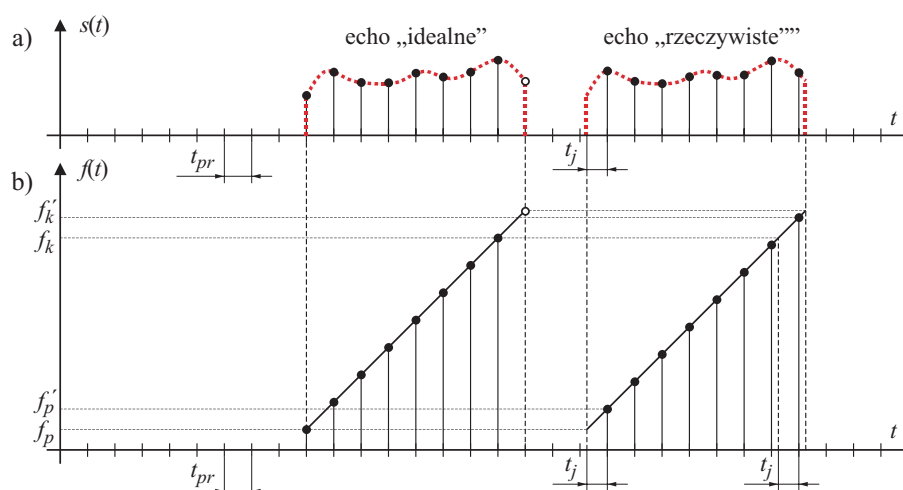


Rys. 3. Zmiany parametru PSL dla małych wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości

2. Dyskretyzacja sygnału radarowego

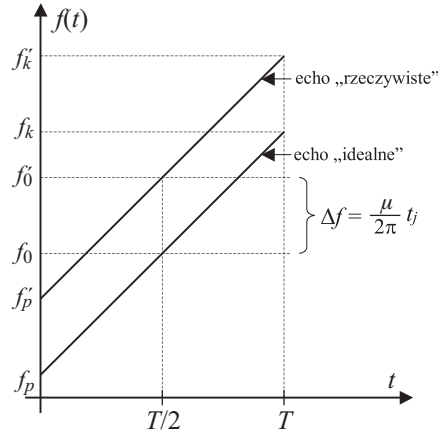
W nowoczesnych rozwiązaniach radarowego systemu odbiorczego sygnał echa zostaje poddany konwersji analogowo-cyfrowej z okresem zegara próbkującego t_{pr} . Operację kompresji realizuje się w filtrze dopasowanym, którego odpowiedź impulsowa zostaje utworzona z ciągu próbek (o tym samym okresie powtarzania t_{pr}) sygnału sondującego.

W idealizowanym przypadku początek sygnału echa pokrywa się z momentem pobierania próbki przez układ konwersji analogowo-cyfrowej (rys. 4a — echo „idealne”). W ogólnym jednak przypadku, ze względu na losowe położenie wykrytego w przestrzeni obiektu względem radaru, momenty te nie pokrywają się (rys. 4a — echo „rzeczywiste”).



Rys. 4. Dyskretyzacja sygnału radarowego

Pierwsza próbka sygnału echa jest opóźniona względem jego początku o czas t_j , mniejszy od okresu próbkowania. Występuje zjawisko przesunięcia czoła impulsu echa względem najbliższej dyskretnej wartości czasu, wyznaczonej przez zegar próbkujący przetwornika analogowo-cyfrowego, nazywany dalej krótko przesunięciem. Przesunięcie to spełnia warunek $t_j \in \langle 0, t_{pr} \rangle$. W przypadku sygnału z modulacją LMCz częstotliwość chwilowa sygnału jest liniową funkcją czasu. W przypadku idealizowanym pierwsza i ostatnia próbka sygnału echa odpowiadać będą chwilowej częstotliwości początkowej f_p i końcowej f_k . W przypadku rzeczywistym pierwsza i ostatnia próbka sygnału echa odpowiadają już innej chwilowej częstotliwości początkowej f'_p i końcowej f'_k (rys. 4b). W rezultacie zależności częstotliwości chwilowej sygnału od czasu, dla obu przypadków, przyjmą postać przedstawioną na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność chwilowej częstotliwości sygnału od czasu, przy braku i występowaniu zjawiska przesunięcia

Poszczególne wielkości określone są wyrażeniami:

$$B = f_k - f_p, \quad f_0 = f_p + \frac{B}{2},$$

$$f'_p = f_p + \frac{\mu}{2\pi} t_j, \quad f'_k = f_k + \frac{\mu}{2\pi} t_j,$$

$$B' = f'_k - f'_p = B, \quad f'_0 = f'_p + \frac{B'}{2} = f_0 + \Delta f = f_0 + \frac{\mu}{2\pi} t_j.$$

Zjawisko przesunięcia wywołuje zatem skutek równoważny dopplerowskiemu przesunięciu częstotliwości. Maksymalną wartość przesunięcia częstotliwości określa wzór

$$\Delta f_{mx} = \frac{\mu}{2\pi} t_{pr}. \quad (7)$$

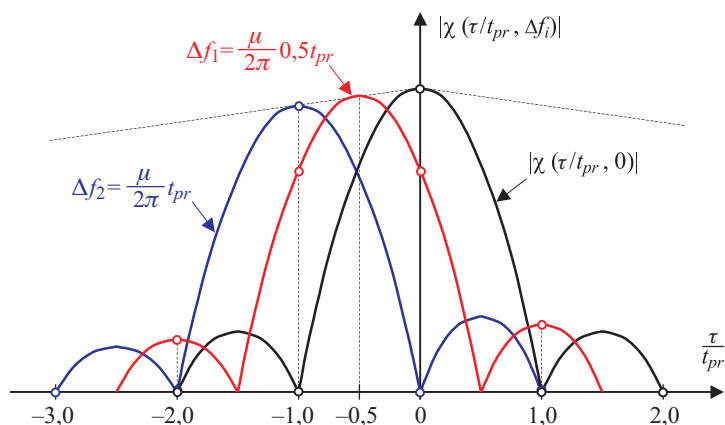
Wobec tego badanie wpływu dyskretyzacji sygnału i wywołanego nim zjawiska przesunięcia, na charakterystyki sygnału po kompresji można sprowadzić do badań wpływu dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości w zakresie jego zmian określonych wyrażeniem (7).

Przyrównując w wyrażeniu (4) argument funkcji Sa[.] do zera, łatwo wykazać, że czasowe przesunięcie maksimum sygnału na wyjściu filtra dopasowanego, wywołane rozważanym zjawiskiem, jest równe

$$\tau_{mx} = -t_j$$

i w skrajnym przypadku może osiągnąć wartość t_{pr} . Znak minus oznacza, że zmiana częstotliwości, wywołana zjawiskiem przesunięcia, odpowiada zbliżeniu się wy-

krywanego obiektu do radaru. Rozpatrywane zjawisko (ograniczając się do listka głównego i jednej pary listków bocznych) pokazano w powiększeniu na rysunku 6.



Rys. 6. Wpływ efektu fluktuacji na amplitudę próbek sygnału po dyskretyzacji

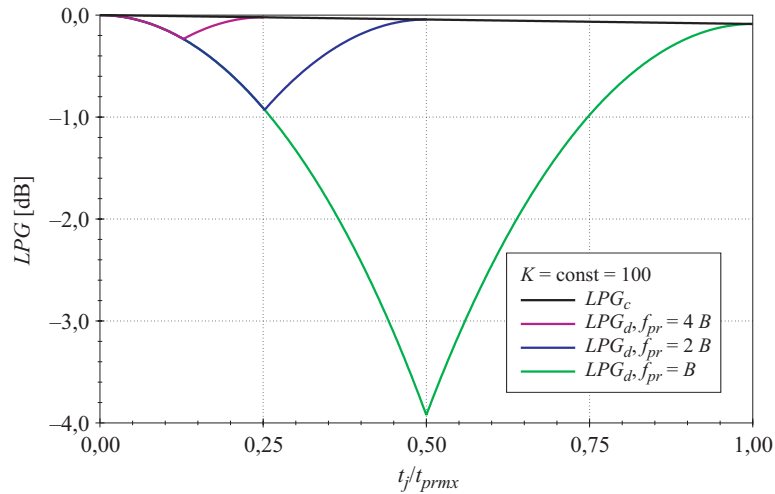
Jeśli sygnał echa radarowego podda się dyskretyzacji, wówczas amplituda maksymalnej próbki listka głównego zmieniać się będzie nie tylko wskutek niedopasowania, ale również wskutek zmiany położenia maksimum sygnału względem zegara próbkującego, co pokazano na rysunku 6. Maksymalna strata poziomu listka głównego wystąpi w przybliżeniu dla czasu $t_j = t_{pr}/2$. Wielkość tych strat jest funkcją okresu próbkowania i maleje wraz ze wzrostem częstotliwości próbkowania. Największa wartość tej częstotliwości, wynikająca z kryterium Nyquista, dla zespolonego sygnału z modulacją LMCz w paśmie podstawowym, równa jest w przybliżeniu jego dewiacji B .

3. Wyniki badań

W celu określenia ilościowych zmian parametrów sygnału na wyjściu filtra dopasowanego, opracowano symulacyjny model układu uwzględniający operację dyskretyzacji oraz zjawisko przesunięcia czoła impulsu. W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano szereg charakterystyk.

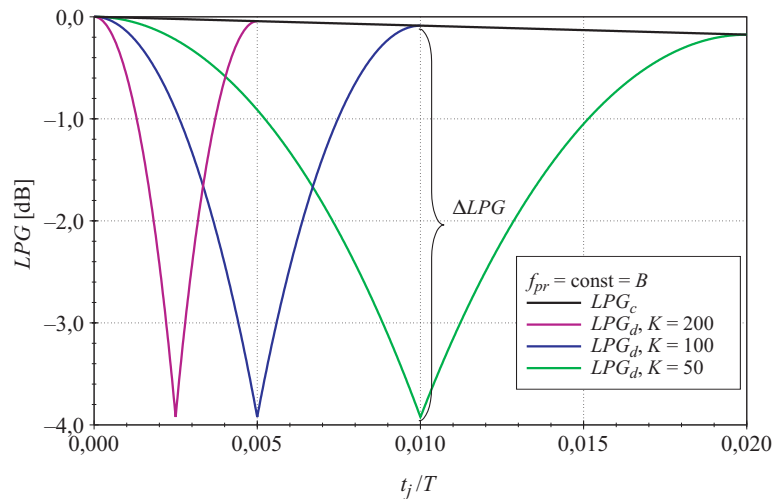
Zależność parametru LPG_d (dla ustalonej wartości bazy sygnału i kilku względnych wartości częstotliwości próbkowania) od wartości t_j pokazano na rysunku 7. Wartość t_j została unormowana w stosunku do maksymalnego okresu próbkowania t_{prmx} , wynikającego z kryterium Nyquista. Dla porównania, na rysunku 7 przedstawiono również przebieg LPG_c (dla ciągłej dziedziny czasu) w funkcji częstotliwości środkowej sygnału w zakresie odpowiadającym maksymalnej wartości t_j . Z przytoczonych przebiegów wynika, że straty poziomu sy-

gnału wyjściowego mogą osiągnąć wartość prawie 4 dB. Dla stosowanych w praktyce wartości częstotliwości próbkowania rzędu $2B$, straty te nadal są istotne i wynoszą około 1 dB.



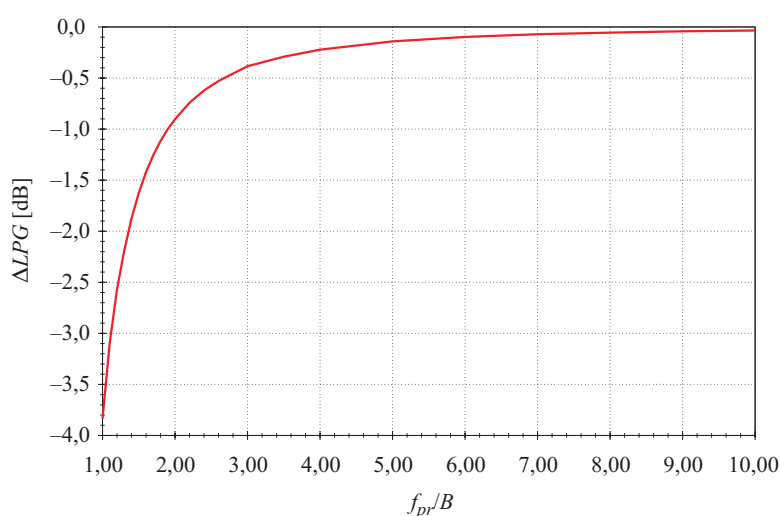
Rys. 7. Zależność względnego poziomu sygnału na wyjściu filtra dopasowanego od względnej wartości t_j oraz od częstotliwości próbkowania

Można wykazać, że przy ustalonej względnej częstotliwości próbkowania bezwzględny poziom minimum parametru LPG_d w funkcji bazy sygnału jest stały, jak pokazano to na rysunku 8.



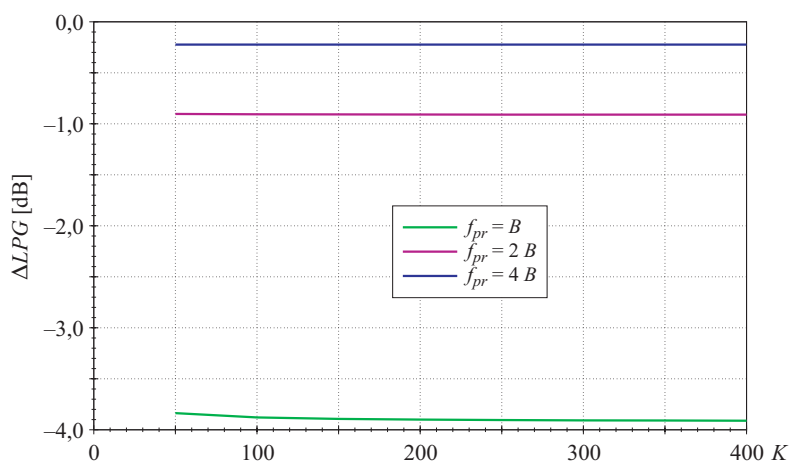
Rys. 8. Zależność względnego poziomu sygnału na wyjściu filtra dopasowanego od względnej wartości t_j oraz od bazy sygnału

Analizując interesującą nas różnicę (ΔLPG) pomiędzy teoretyczną wartością parametru LPG_c , wyznaczoną dla ciągłej dziedziny czasu, a wartością rzeczywistą LPG_d , wyznaczoną dla dyskretnej dziedziny czasu, otrzymuje się charakterystykę przedstawioną na rysunku 9. Charakterystykę wyznaczono dla sygnału o bazie równej 50, ale przebiegi dla innych wartości bazy sygnału praktycznie nie odbiegają od przedstawionego na rysunku 9.



Rys. 9. Zależność strat poziomu sygnału ΔLPG od względnej wartości częstotliwości próbkowania

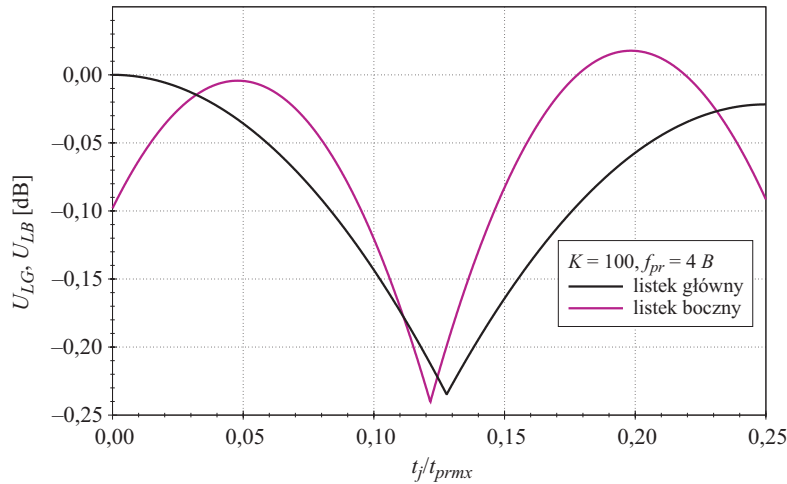
Zależność parametru ΔLPG od bazy sygnału, dla kilku ustalonych częstotliwości próbkowania, pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Zależność strat poziomu sygnału ΔLPG od bazy sygnału

Z przedstawionych przebiegów wynika, że maksymalny spadek poziomu sygnału, wywołany zjawiskiem przesunięcia czoła impulsu, nie zależy praktycznie od wartości bazy sygnału.

W rozważanym zakresie zmian częstotliwości środkowej sygnału echa, spowodowanych dyskretyzacją, wywołującą zjawisko przesunięcia czoła impulsu, przemieszczenie czasowej postaci sygnału na wyjściu filtra dopasowanego powoduje zmiany bezwzględnego poziomu maksimum listków: głównego U_{LG} i bocznego U_{LB} . Zależność tę przedstawiono na rysunku 11, przy czym charakterystyki unormowano do maksymalnej wartości obu listków dla ciągłej dziedziny czasu, przy zerowym przesunięciu częstotliwości.

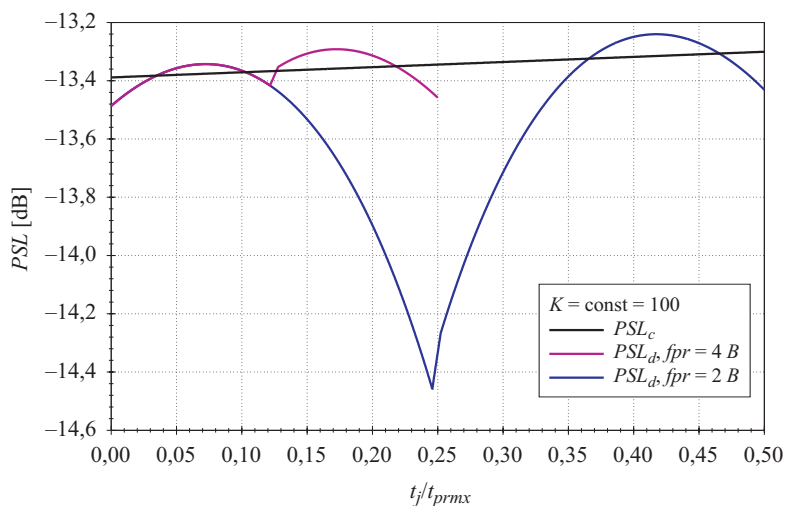


Rys. 11. Zależność maksimum listka głównego i bocznego po dyskretyzacji od względnej wartości t_j

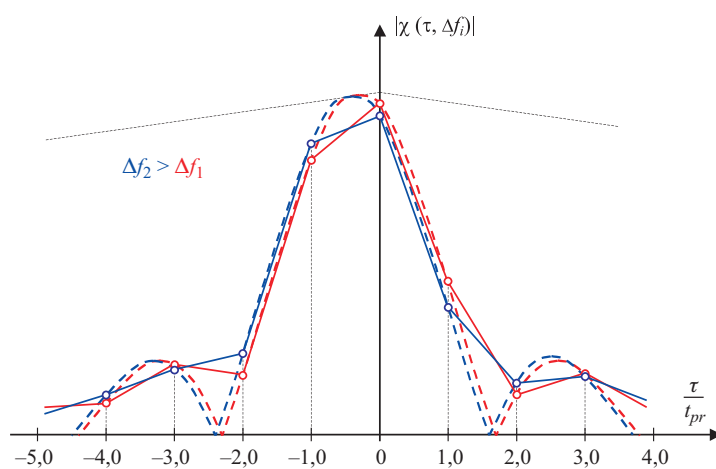
Powyższa zależność skutkuje zmianami względnego poziomu listków bocznych (PSL_{li}). Przedstawiono to na rysunku 12 dla dwóch różnych wartości częstotliwości próbkowania. Dla porównania na rysunku 12 przedstawiono również przebieg PSL_c dla ciągłej dziedziny czasu w funkcji środkowej częstotliwości sygnału, w zakresie odpowiadającym maksymalnej wartości t_j .

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że interesujące dla praktyki potencjalne pogorszenie względnego poziomu listków bocznych jest nieznaczne, rzędu 0,1 dB. Co więcej, dla pewnych wartości t_j występuje poprawa tego poziomu, zależna od częstotliwości próbkowania, przekraczająca wartość 1 dB.

Jednak dla dyskretnej dziedziny częstotliwości występuje dodatkowe zjawisko, polegające na łączeniu listków bocznych z listkiem głównym i poszerzeniu tego ostatniego. Mechanizm tego zjawiska pokazano na rysunku 13.



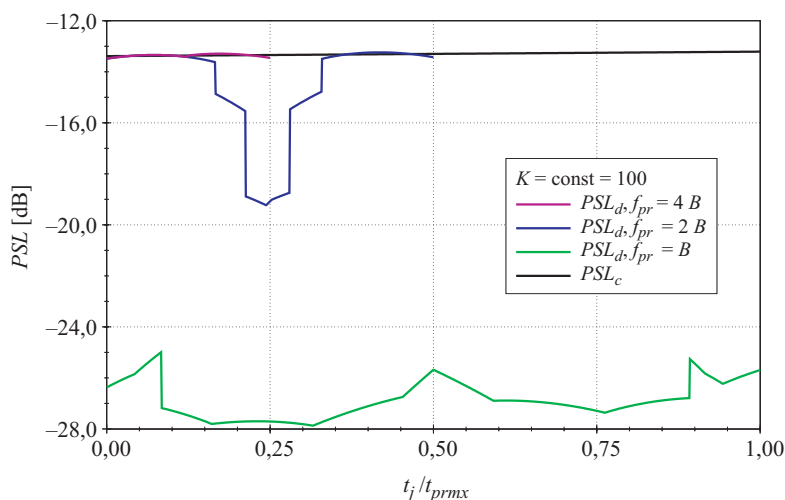
Rys. 12. Zależność względnego poziomu listków bocznych od względnej wartości t_j oraz od częstotliwości próbkowania



Rys. 13. Ilustracja zjawiska łączenia listka bocznego z listkiem głównym

W rezultacie względne zmiany poziomu listków bocznych (PSL_d), dla najniższych dopuszczalnych częstotliwości próbkowania, zawierają charakterystyczne nieciągłości, przedstawione na rysunku 14.

Na tym rysunku dodatkowo przedstawiono przypadek próbkowania o częstotliwości równej częstotliwości Nyquista (B), charakteryzujący się wyraźnie niższym poziomem listków bocznych. Jest to przypadek szczególny, odpowiadający sygnałowi z wielowartościową manipulacją fazy kodem P4 [3].



Rys. 14. Zależność względnego poziomu listków bocznych od względnej wartości t_j oraz od częstotliwości próbkowania, z uwzględnieniem zjawiska łączenia bocznego listka i głównego

Podsumowanie

W rozwiązaniach radarowego systemu odbiorczego wykorzystujących cyfrowe techniki przetwarzania sygnału, istotnego znaczenia nabiera naturalne zjawisko przesunięcia czoła impulsu echa radarowego względem najbliższej dyskretnej wartości czasu, wyznaczonej przez zegar próbkujący przetwornika analogowo-cyfrowego.

W niniejszej pracy wykazano, że zjawisko to, dla sygnału z modulacją LMCz, wywołuje skutek równoważny dopplerowskiemu przesunięciu częstotliwości sygnału echa radarowego. Przesunięcie to powoduje niepożądaną modulację amplitudy próbek sygnału na wyjściu filtra kompresji, wywołaną procesem dyskretyzacji. W rezultacie występują straty poziomu sygnału użytecznego (*LPG*), które mogą osiągać wartości do 4 dB. Straty te są funkcją przyjętej częstotliwości próbkowania. Wyznaczono zależność poziomu tych strat od częstotliwości próbkowania. Dodatkowo, zjawisko przesunięcia może obniżyć skuteczność działania układów tłumienia ech stałych.

Ponadto w pracy wykazano, że wpływ zjawiska przesunięcia czoła impulsu na względny poziom listków bocznych nie wywołuje istotnego pogorszenia tego parametru. Straty *PSL* nie przekraczają ułamka decybel.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] C. E. COOK, M. BERNFELD, *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*, Artech House, Norwood, MA, 1993.
- [2] N. LEVANON, E. MOZESON, *Radar Signals*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2004.
- [3] P. Z. PEEBLES, JR., *Radar Principles*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1998.

CZ. LEŚNIK, A. KAWALEC, J. PIETRASIŃSKI

Discretization process impact on compressed radar signal parameters

Abstract. Modern techniques of digital signal processing are the basis of modern radar receiver systems. It causes that radar characteristics are created among others by digitization procedure including its additional products. That is why awareness concerning these products presence and their qualitative and quantitative estimation is difficult to overestimate. An example of such a product is an effect of an echo — pulse leading edge random position with relation to a nearest discrete time value determined by an AD converter sampling clock. This effect influence on signal characteristics at the output of the digital compression filter is very important.

The essence of the phenomenon caused by radar chirp signal digitization is presented in the paper. To be more precise — efforts leading to qualitative and quantitative estimation of this phenomenon influence on radar signal after compression were undertaken. The LFM signal was chosen into consideration. Tested signal parameters were as follows: relative level of a peak side lobe (*PSL*) and echo signal loses caused by a mismatch. Considerations are illustrated by simulation test results. Practical conclusions were taken on the basis of the achieved results.

Keywords: radar, pulse compression, LFM, Doppler effect, digital compression filter

Universal Decimal Classification: 621.396.96.08