



Analiza porównawcza algorytmów adaptacyjnego przetwarzania przestrzenno-czasowego w zastosowaniach radiolokacyjnych

ANNA ŚLESICKA, ADAM KAWALEC

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,
Instytut Radioelektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
anna.slesicka@wat.edu.pl, adam.kawalec@wat.edu.pl

Streszczenie. W publikacji przedstawiono opis, założenia oraz kolejne etapy algorytmu adaptacyjnego przetwarzania przestrzenno-czasowego STAP (ang. *Space-Time Adaptive Processing*) wykorzystywanego jako narzędzie przetwarzania sygnałów w radarach. Porównano i pokazano możliwości wykrycia obiektu za pomocą sześćoelementowego szyku antenowego bez przetwarzania przestrzenno-czasowego oraz z zastosowaniem techniki STAP. Przedstawiono wyniki symulacji zastosowania algorytmu STAP dla standardowego zestawu parametrów. Wreszcie porównano i pokazano możliwości wykrycia obiektu za pomocą techniki STAP na tle innych algorytmów DPCA (ang. *Displaced Phase Centre Antenna*) oraz ADPCA (ang. *Adaptive DPCA*).

Słowa kluczowe: adaptacyjne przetwarzanie przestrzenno-czasowe, STAP, DPCA, ADPCA, przetwarzanie sygnałów, radar

DOI: 10.5604/01.3001.0014.5649

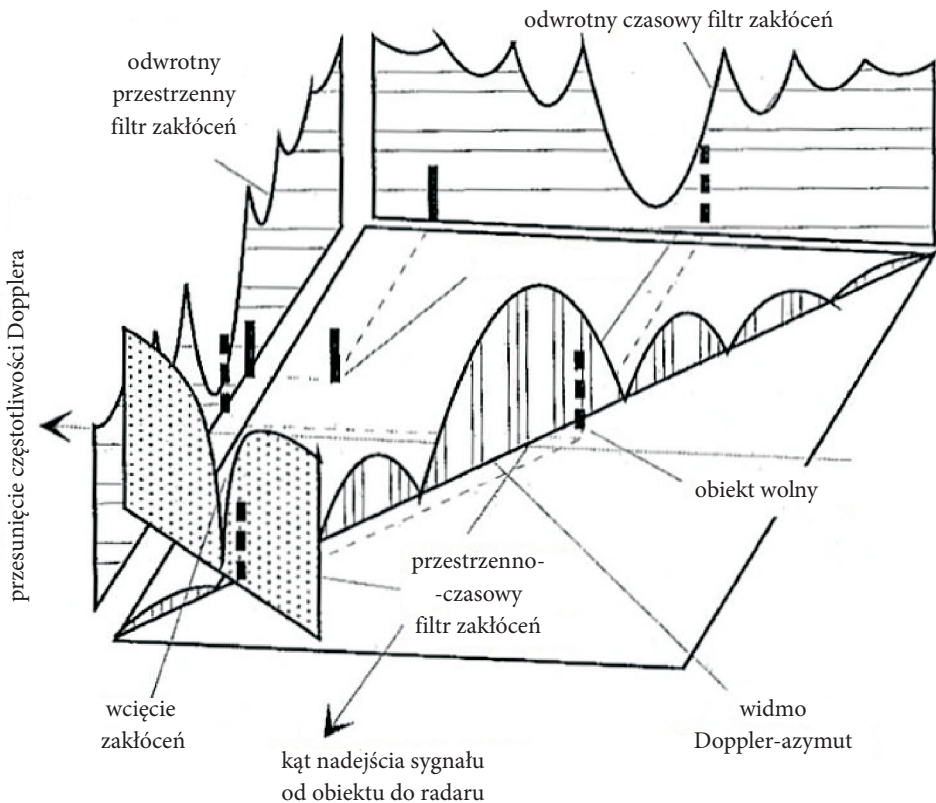
1. Wstęp

Adaptacyjne przetwarzanie przestrzenno-czasowe jest techniką przetwarzania sygnałów używaną w systemach radarowych. Technikę STAP stosuje się do detekcji obiektów poruszających się po powierzchni ziemi poprzez system radarowy umieszczony na platformie latającej. Technika ta umożliwia detekcję ruchomego celu oraz eliminację zakłóceń, które mają charakter dwuwymiarowy. STAP jest skojarzeniem dwóch technik: MTI (ang. *Moving Target Indication*) — techniki tłumienia ech stałych,

która pracuje tylko w dziedzinie czasu oraz techniki związanej z antenami adaptacyjnymi pracującej w dziedzinie przestrzennej w celu eliminacji zakłóceń mających charakter kierunkowy.

Celem artykułu jest przedstawienie algorytmu STAP, którego opis w polskiej literaturze technicznej jest bardzo skromny, a także porównanie i pokazanie możliwości wykrycia poruszającego się obiektu na tle zakłóceń z zastosowaniem algorytmu STAP oraz algorytmów DPCA oraz ADPCA.

Radar umieszczony na platformie latającej odbiera echa zakłóceń ze zmianą częstotliwości wywołaną efektem Dopplera, która zależy wprost proporcjonalnie od prędkości względnej pomiędzy radarem a pojedynczym elementem rozpraszającym oraz kątem między kierunkiem lotu platformy z zamontowanym radarem a pojedynczym elementem rozpraszającym. Wykrycie celu jest ograniczone tylko przez rozdzielczość przestrzenną wiązki oraz rozdzielczość widmową Dopplera. Na rysunku 1 przedstawiono wpływ zakłóceń radiolokacyjnych na detekcję obiektów.

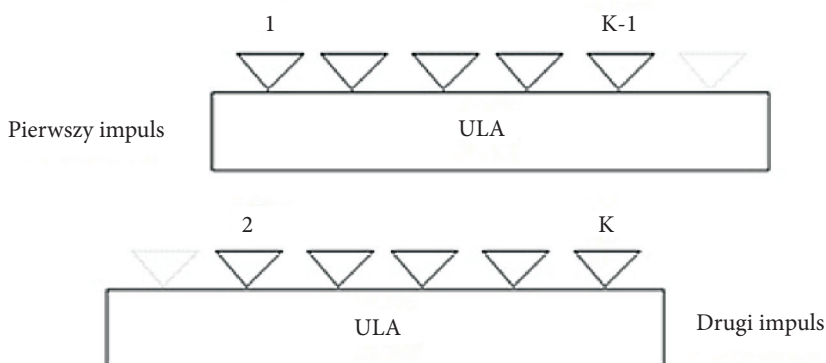


Rys. 1. Wpływ zakłóceń radiolokacyjnych w przestrzeni Dopplera. Opracowano na podstawie [1]

Zakłócenia aktywne (ang. *jammer*) emitowane przez nadajniki zakłóceń przecinają wszystkie komórki częstotliwości Dopplera ze względu na ich szerokopasmowy charakter podobny do szumu oraz pojawiają się pod różnym kątem nadejścia. W związku z tym, że zakłócenia są transmitowane w sposób ciągły, ich energia jest obecna we wszystkich komórkach odległościowych. Na rysunku przedstawiono również stopień zakłóceń pasywnych (ang. *clutter*) odbitych od nieruchomych obiektów na powierzchni ziemi. Na rysunku zaznaczono także dwa typy możliwych do wykrycia obiektów. Obiekt „wolny” to taki, którego częstotliwość Dopplera jego echa znajduje się w zakresie częstotliwości Dopplera zakłóceń pasywnych (*clutter*) i nie da się go odfiltrować metodami klasycznej filtracji czasowej. Obiekt „szybki” to taki, którego częstotliwość Dopplera wynikająca z prędkości względnej platformy z radarem względem ziemi jest większa od częstotliwości maksymalnej zakłóceń pasywnych.

2. Alternatywne metody przetwarzania przestrzenno-czasowego

Pierwszym podejściem do przetwarzania przestrzenno-czasowego echa zakłóceń była technika DPCA. Wykorzystuje się w niej przesuniętą aperturę, aby skompensować ruch platformy w celu eliminacji zakłóceń pasywnych. Tłumienie zakłóceń pasywnych za pomocą metody DPCA jest często stosowane w liniowych szyskach antenowych ULA i wymaga specjalnych warunków dopasowania prędkości ruchu platformy, na której znajduje się radar. Oś szysku antenowego ULA musi znajdować się w jednej płaszczyźnie z wektorem prędkości poruszającej się platformy. Prędkość platformy musi być tak dobrana, żeby w czasie trwania jednego impulsu przebyć drogę równą połowie odległości między elementami szysku antenowego.



Rys. 2. Koncepcja DPCA dla szysku antenowego ULA

Na rysunku 2 schematycznie pokazano sposób eliminacji zakłóceń techniką DPCA. Usuwa ona zakłócenia poprzez odjęcie dwóch kolejnych ech odebranych sygnałów. Jeżeli na rysunku K oznacza liczbę elementów szyku liniowego ULA, to echo sygnału odebrane przez anteny od 1 do $K-1$ po nadaniu pierwszego impulsu jest takie samo jak echo odebrane przez anteny od 2 do K po nadaniu drugiego impulsu. Dzięki odjęciu ech odebranych sygnałów przez te dwa podszyki zakłócenia mogą zostać skutecznie wyeliminowane.

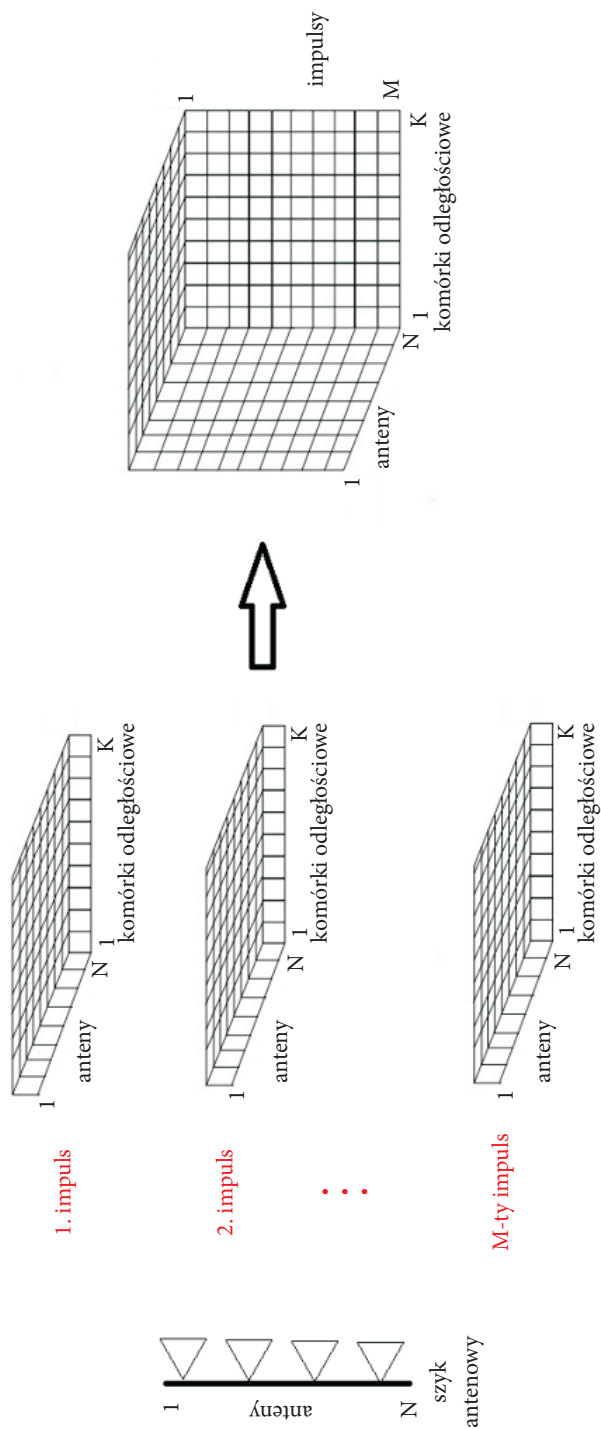
Technika DPCA jest zasadniczo nieadaptacyjna. Przetwarzanie adaptacyjne jest konieczne wtedy, gdy nieznanne są parametry odbieranego widma zakłóceń. Natomiast technika ADPCA to technika suboptymalna STAP. Potrafi skutecznie tłumić zakłócenia zarówno pasywne, jak i aktywne. Technika ADPCA jest alternatywą o niskiej złożoności obliczeniowej w stosunku do optymalnej techniki adaptacyjnego przetwarzania przestrzenno-czasowego STAP. Szczegółowy opis techniki ADPCA można znaleźć w [6].

3. Algorytm STAP

Istotą algorytmów STAP jest wykorzystywanie danych radarowych zebranych przez N anten po nadaniu ciągu M impulsów z K komórek odległościowych. Liczba komórek odległościowych zależy wprost od częstotliwości powtarzania impulsów. W ten sposób zostaje utworzona trójwymiarowa kostka danych, co zostało pokazane na rysunku 3 [1].

Przebieg algorytmu STAP jest następujący. Przez szyk antenowy zostaje nadana sekwencja koherentnych impulsów. Następnie skojarzona sekwencja sygnałów odbitych odbierana jest przez anteny. Echa sygnałów są wzmacniane, dalej w mieszaczach następuje przemiana częstotliwości w dół oraz ostatecznie echa są dyskretyzowane. Następny krok zawiera adaptację filtra zakłóceń do aktualnie odebranego echa zakłóceń. Adaptacja jest wykonana poprzez estymację przestrzenno-czasowej macierzy kowariancji z przykładowych danych pomocniczych. W literaturze przedmiotu wyróżnia się dwie zasadnicze metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń: statystyczną oraz niestatystyczną. W artykule, ze względu na prostotę implementacji, przedstawiono statystyczną metodę estymacji macierzy kowariancji zakłóceń SMI (ang. *sample matrix inversion*).

Następnym krokiem jest filtrowanie odebranego echa do momentu wyeliminowania składowych zakłóceń. Pozostały sygnał wraz z szumem jest następnie dopasowywany do filtra przestrzenno-czasowego, który w zasadzie jest połączeniem formatora wiązki (ang. *beamformer*) oraz banku filtra Dopplera (czyli zbioru filtrów uwzględniających różne prędkości celu), ponieważ nieznanne jest przesunięcie częstotliwości Dopplera. Sygnały wyjściowe z banku filtra Dopplera są wykorzystywane do tworzenia funkcji testowej, która ma być porównana z progiem wykrycia.



Rys. 3. Kostka danych STAP

Istotą STAP jest przyjęcie hipotezy, że istnieje obiekt poruszający się z daną prędkością w danej lokalizacji (danym przekroju radarowej kostki danych), a następnie stworzenie filtra charakteryzującego się dużym wzmocnieniem sygnału użytecznego od obiektu oraz jednocześnie dużym tłumieniem zakłóceń pasywnych od nieruchomych obiektów i aktywnych zakłóceń radiolokacyjnych. STAP umożliwia generowanie hipotez dotyczących lokalizacji i prędkości dla wielu obiektów zainteresowania, a wszystkie są kolejno przetwarzane w czasie rzeczywistym, jednak odbywa się to kosztem bardzo wysokich wymagań obliczeniowych dotyczących przetwarzania i przepustowości STAP.

Po utworzeniu radarowej kostki danych na wstępie algorytmu STAP należy dla każdego obiektu wyznaczyć wektor sterujący \mathbf{S}_{s-t} . Wektor ten jest iloczynem Kroneckera wektora sterującego w dziedzinie czasu \mathbf{S}_t oraz wektora sterującego w dziedzinie przestrzennej \mathbf{S}_{sp} .

Wektor sterujący w dziedzinie czasu dla danego obiektu, czyli dla danego przesunięcia częstotliwości Dopplera, jest przedstawiany jako [1-8]:

$$\mathbf{S}_t(f_d) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\theta_1 f_d} \\ e^{j\theta_2 f_d} \\ \vdots \\ e^{j\theta_{(M+)} f_d} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie: f_d — przesunięcie częstotliwości Dopplera danego obiektu,
 M — liczba impulsów.

Przesunięcie częstotliwości Dopplera dane jest zależnością [1-7]

$$f_d = \frac{2 \cdot V_r}{\lambda}, \quad (2)$$

gdzie: V_r — prędkość radialna pomiędzy obiektem a radarem,
 λ — długość fali, na jakiej pracuje radar.

Wektor sterujący w dziedzinie przestrzennej dla danego obiektu, czyli dla danej częstotliwości przestrzennej, dany jest jako:

$$\mathbf{S}_{sp}(f_{sp}) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\alpha 1 f_{sp}} \\ e^{j\alpha 2 f_{sp}} \\ \vdots \\ e^{j2\pi(N-1)f_{sp}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gdzie: f_{sp} — częstotliwość przestrzenna danego obiektu,
 N — liczba anten.

Częstotliwość przestrzenna dana jest jako:

$$f_{sp} = \frac{d}{\lambda} \cos(\alpha), \quad (4)$$

gdzie: d — odległość między elementami szyku antenowego,
 α — kąt nadejścia sygnału.

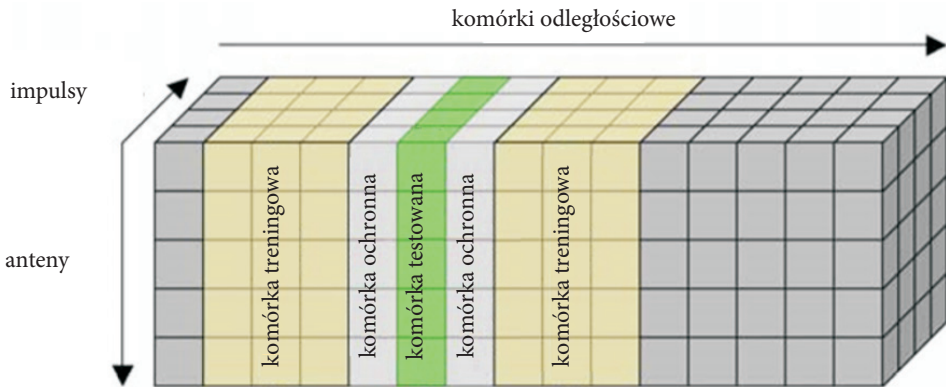
Ostatecznie wektor sterujący dla danego obiektu można przedstawić jako [1-7]:

$$\mathbf{S}_{s-t}(f_{sp}, f_d) = \mathbf{S}_t(f_d) \cdot \mathbf{S}_{sp}(f_{sp}) = \begin{bmatrix} 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 1 \\ e^{j2\pi f_{sp}} \cdot 1 \\ e^{j2\pi 2 f_{sp}} \cdot 1 \\ \vdots \\ e^{j2\pi(M-1)f_{sp}} \cdot 1 \\ 1 \cdot e^{j2\pi f_d} \\ e^{j2\pi f_{sp}} \cdot e^{j2\pi f_d} \\ \vdots \\ \vdots \\ e^{j2\pi(M-1)f_{sp}} \cdot e^{j2\pi(N-1)f_d} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Wektor sterujący ma wymiary [(liczba anten · liczba impulsów) × 1].

Następnie należy wyznaczyć macierz kowariancji zakłóceń \mathbf{X}_1 . W przypadku statystycznej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń należy dokonać obliczeń i uśrednienia dla kilku przekrojów komórek otaczających interesujący nas zakres. Zakres komórek odległościowych wokół komórki testowanej nazywa się komórkami treningowymi [7]. Wektorem kolumnowym \mathbf{y} oznaczono pojedynczy przekrój radarowej kostki danych utworzony z przekształcenia przekroju o wymiarze [liczba anten \times liczba impulsów] na wektor kolumnowy o wymiarze [$1 \times$ (liczba anten \cdot liczba impulsów)] — rys. 4. W związku z faktem, że macierz kowariancji jest bardzo trudna do wyznaczenia, jest ona estymowana. Ponieważ macierz kowariancji zostanie wykorzystana do obliczenia optymalnego filtra, nie powinna zawierać danych docelowych (obiektu). Z tego też powodu nie jest obliczana z użyciem danych komórki odległościowej, w której oczekuje się lokalizacji obiektu. Zamiast tego używa się średniej macierzy kowariancji w wielu otaczających komórkach odległościowych, ale nie w docelowym zakresie lokalizacji (rys. 4). Oznacza to konieczność wielokrotnego wyznaczania macierzy kowariancji na podstawie radarowej kostki danych. Macierz kowariancji z definicji będzie iloczynem wektorowym:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{y}^* \cdot \mathbf{y}^T. \quad (6)$$



Rys. 4. Estymacja macierzy kowariancji przy użyciu sąsiednich komórek odległościowych

Wektor \mathbf{y} jest sprzężony, a następnie pomnożony przez jego transpozycję. Ponieważ \mathbf{y} ma wymiar [$1 \times$ (liczba anten \cdot liczba impulsów)], to macierz kowariancji \mathbf{X}_1 będzie miała wymiar [(liczba anten \cdot liczba impulsów) \times (liczba anten \cdot liczba impulsów)].

Macierz kowariancji reprezentuje stopień korelacji na wejściach szyku antenowego i na impulsach znajdujących się w koherentnym odstępzie przetwarzania (CPI).

Jak wcześniej wspomniano, celem algorytmu jest stworzenie optymalnego filtra do usunięcia zakłóceń, w wyniku czego możliwe będzie wykrycie obiektu. Przyjęto występowanie zakłóceń pasywnych (ang. *clutter*), zakłóceń aktywnych (ang. *jammer*) oraz szumu (ang. *noise*). Do obliczeń oraz symulacji przyjęto, że występujące zakłócenia mają charakter gaussowski.

Oszacowana macierz kowariancji zakłóceń służy do stworzenia optymalnego filtra zakłóceń. W tym celu należy odwrócić macierz kowariancji. Zabieg ten jest bardzo kosztowny obliczeniowo. Zależność na filtr optymalny jest następująca [7]:

$$\mathbf{w}_{opt} = \beta \cdot \mathbf{X}_I^{-1} \cdot \mathbf{S}_{s-t} (f_{sp}, f_d)^*, \quad (7)$$

gdzie: \mathbf{w}_{opt} — filtr optymalny,
 β — współczynnik,
 \mathbf{X}_I^{-1} — odwrotna macierz kowariancji zakłóceń,
 $\mathbf{S}_{s-t}(f_{sp}, f_d)^*$ — sprzężony wektor sterujący.

Jedną z metod rozwiązywania \mathbf{X}_I znana jest jako rozkład QR. Rozkład QR w algebrze liniowej to rozkład macierzy \mathbf{A} do postaci iloczynu dwóch macierzy $\mathbf{A} = \mathbf{QR}$ [2], gdzie \mathbf{Q} jest macierzą ortogonalną ($\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}$) i \mathbf{R} jest macierzą trójkątną górną. Inną popularną metodą rozwiązywania tego typu macierzy jest rozkład Choleskiego dodatnio określonej macierzy \mathbf{A} na iloczyn postaci $\mathbf{A} = \mathbf{LL}^T$, gdzie \mathbf{L} jest dolną macierzą trójkątną, a \mathbf{L}^T jej transpozycją.

$$\mathbf{X}_I = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R} \quad (8)$$

gdzie: \mathbf{Q} — macierz ortogonalna,
 \mathbf{R} — macierz trójkątna górna.

\mathbf{Q} i \mathbf{R} mogą być obliczone z \mathbf{X}_I przy użyciu jednej z kilku metod takich jak: ortogonalizacja Grama-Schmidta, transformacja Householdera lub rotacja Givensa [2]. Macierze ortogonalne mają bardzo ważną własność:

$$\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^H = \mathbf{I}_n \quad (9)$$

lub

$$\mathbf{Q}^{-1} = \mathbf{Q}^H \quad (10)$$

gdzie: \mathbf{Q}^H — macierz transponowana względem macierzy \mathbf{Q} ,
 \mathbf{I}_n — macierz jednostkowa wymiaru n .

W związku z tym zależność na filtr optymalny przyjmuje postać:

$$\mathbf{Q} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{w}_{opt} = \mathbf{S}_{s-t} (f_{sp}, f_d)^* \quad (11)$$

Ponieważ \mathbf{R} jest macierzą trójkątną górną, \mathbf{w}_{opt} może być rozwiązane za pomocą metody podstawienia. Obliczanie macierzy rozpoczyna się od dolnego rzędu, który ma jeden niezerowy element, dzięki temu otrzymuje się rozwiązanie dla dolnego elementu \mathbf{w}_{opt} . Następnie wynik ten jest podstawiany wstecz dla drugiego od dołu wiersza z dwoma niezerowymi elementami w macierzy \mathbf{R} , dzięki czemu otrzymuje się drugi element \mathbf{w}_{opt} . Obliczenia wykonuje się aż do uzyskania całkowitego rozwiązania wektora \mathbf{w}_{opt} . Należy zwrócić uwagę, że z racji tego, iż wektor sterujący \mathbf{S}_{s-t} jest odmienny dla każdego obiektu, obliczenia za pomocą podstawienia wstecz trzeba wykonywać dla każdego wektora sterującego. Następnie wyznacza się rzeczywisty wektor wag \mathbf{w} :

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{w}_{opt}}{\mathbf{S}_{s-t} (f_{sp}, f_d)^* \cdot \mathbf{w}_{opt}^*}, \quad (12)$$

gdzie: $\mathbf{S}_{s-t} (f_{sp}, f_d)^* \cdot \mathbf{w}_{opt}^*$ — skalar, współczynnik wagowy.

Ostateczne rozwiązanie dla wykrywania η na podstawie iloczynu skalarnego \mathbf{w} i wektora \mathbf{y} dla danego przekroju radarowej kostki danych przyjmuje postać:

$$\zeta = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{y} \quad (13)$$

Gdzie η to skalar, który następnie jest porównywany z wartością progu wykrywania dla przyjętej statystki testowej na obecność obiektu [3]:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{brak obiektu} \\ H_1: & \text{obecność obiektu,} \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie hipoteza H_0 oznacza brak obiektu, zaś H_1 oznacza hipotezę o istnieniu obiektu.

W tabeli 1 zawarto najważniejsze parametry wykorzystane do symulacji. Wybrane parametry bardzo często w literaturze przedmiotu badań nazywa się standardowym zestawem parametrów [4].

Tabela 1. Parametry wykorzystane do symulacji

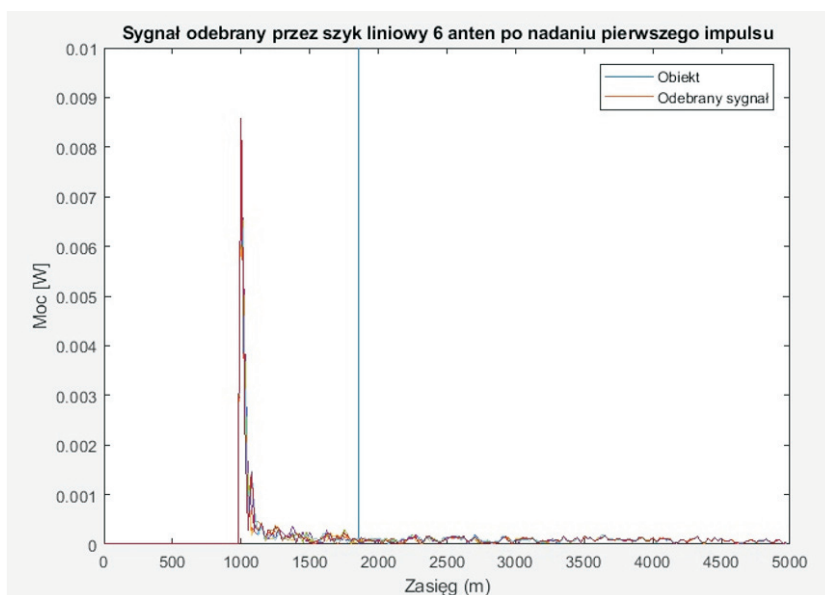
| Parametr | Symbol | Wartość |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Radar | | |
| Częstotliwość pracy radaru | f_c | 10 GHz |
| Długość fali | λ | 0,03 m |
| Częstotliwość próbkowania | f_s | 6 MHz |
| Czas trwania impulsu | τ | 33 μ s |
| Częstotliwość powt. impulsów | PRF | 30 kHz |
| Liczba impulsów | M | 16 |
| Zasięg | R | 5000 m |
| Szerokość komórki odległościowej | R_{bin} | 25 m |
| Liczba komórek odległościowych | N | 200 |
| Szyk antenowy | | |
| Liczba anten w szyku | N | 6 |
| Odległość między antenami | $d = \lambda/2$ | 0,015 m |
| Moc nadajnika | P_p | 5,6 kW |
| Zysk kierunkowy | G | 20 dB |
| Temperatura szumów anteny | T_n | 290 K |
| Platforma | | |
| Model ruchu platformy | - | Ze stałą prędkością |
| Wysokość | H | 1200 m |
| Prędkość w kierunku osi Y | V_r | 225 m/s |
| Obiekt | | |
| Prędkość w kierunku osi X | V_{ox} | 30 m/s |
| Prędkość w kierunku osi Y | V_{oy} | 30 m/s |
| Położenie obiektu | X | x = 1100; y = 900; z = 0 |
| Skuteczna pow. odbicia obiektu | RCS | 1 m ² |
| Zakłócenia | | |
| Moc nadajnika zakłóceń aktywnych | ERP | 100 W |
| Położenie początkowe nadajnika | J | x = 1100; y = 1700; z = 1200 |
| Współczynnik zakłóceń pasywnych | γ | -15 dB |
| Szum | - | Szum biały o rozkładzie gaussowskim |

4. Wyniki symulacji

W celu poprawności działania opisanego powyżej algorytmu STAP, a także porównania jego wydajności na tle algorytmów DPCA oraz ADPCA zasymulowano w środowisku MATLAB możliwość wykrycia obiektu przez system radarowy umieszczony na platformie latającej w obecności zakłóceń pasywnych oraz nadajnika zakłóceń [9].

Radar umieszczony na platformie latającej na wysokości $H = 1200$ metrów przemieszcza się wzdłuż osi anten, tak aby w trakcie jednego okresu powtarzania impulsów przemieścić się o połowę odległości pomiędzy elementami anten. Wykrycie obiektu utrudnia dodatkowo umieszczony nadajnik zakłóceń. Obiekt znajduje się na powierzchni ziemi, nadajnik zakłóceń umieszczono również na wysokości 1200 metrów.

Zasymulowany liniowy szyk antenowy składa się z sześciu anten izotropowych pracujących na częstotliwości 10 GHz. Odległość pomiędzy antenami dobrano tak, aby była równa połowie długości fali, w tym przypadku to 0,015 m. W wyniku symulacji przez szyk antenowy nadano ciąg szesnastu impulsów, o częstotliwości powtarzania impulsów równej 30 kHz oraz czasie trwania impulsu równym 33 μ s. Następnie odebrano sygnał odbity od obiektów, ale także zakłócenia pasywne od powierzchni ziemi oraz sygnał zakłócający z nadajnika. W artykule nie podano zależności analitycznej opisującej nadawane impulsy ze względu na wykorzystywanie gotowych modułów zaimplementowanych w środowisku MATLAB, wymagających jedynie podania liczby impulsów, częstotliwości ich powtarzania, mocy nadajnika oraz czasu trwania impulsu.



Rys. 5. Sygnał odebrany przez szyk sześciu anten po nadaniu pierwszego impulsu

Na rysunku 5 przedstawiono zależność wartości sygnałów odebranych przez radar zamontowany na platformie latającej w funkcji zasięgu. Na tym etapie odebrane sygnały tworzą surowe dane, które nie są jeszcze poddane przetwarzaniu przestrzenno-czasowemu. W związku z tym radar na tle silnych zakłóceń nie będzie w stanie wskazać położenia obiektu. Jak łatwo można zauważyć, radar mylnie wskazuje, że obiekt jest w odległości 1000 m od radaru.

Surowe dane w kolejnym kroku poddano różnym algorytmom przetwarzania przestrzenno-czasowego, aby móc wyłumić niepożądane zakłócenia. Dla tak zadanych parametrów radarowa kostka danych ma wymiar $[200 \times 6 \times 16]$, gdzie wartość 200 oznacza liczbę komórek odległościowych, 6 to liczba anten w szyku oraz 16 to liczba wypromieniowanych impulsów.

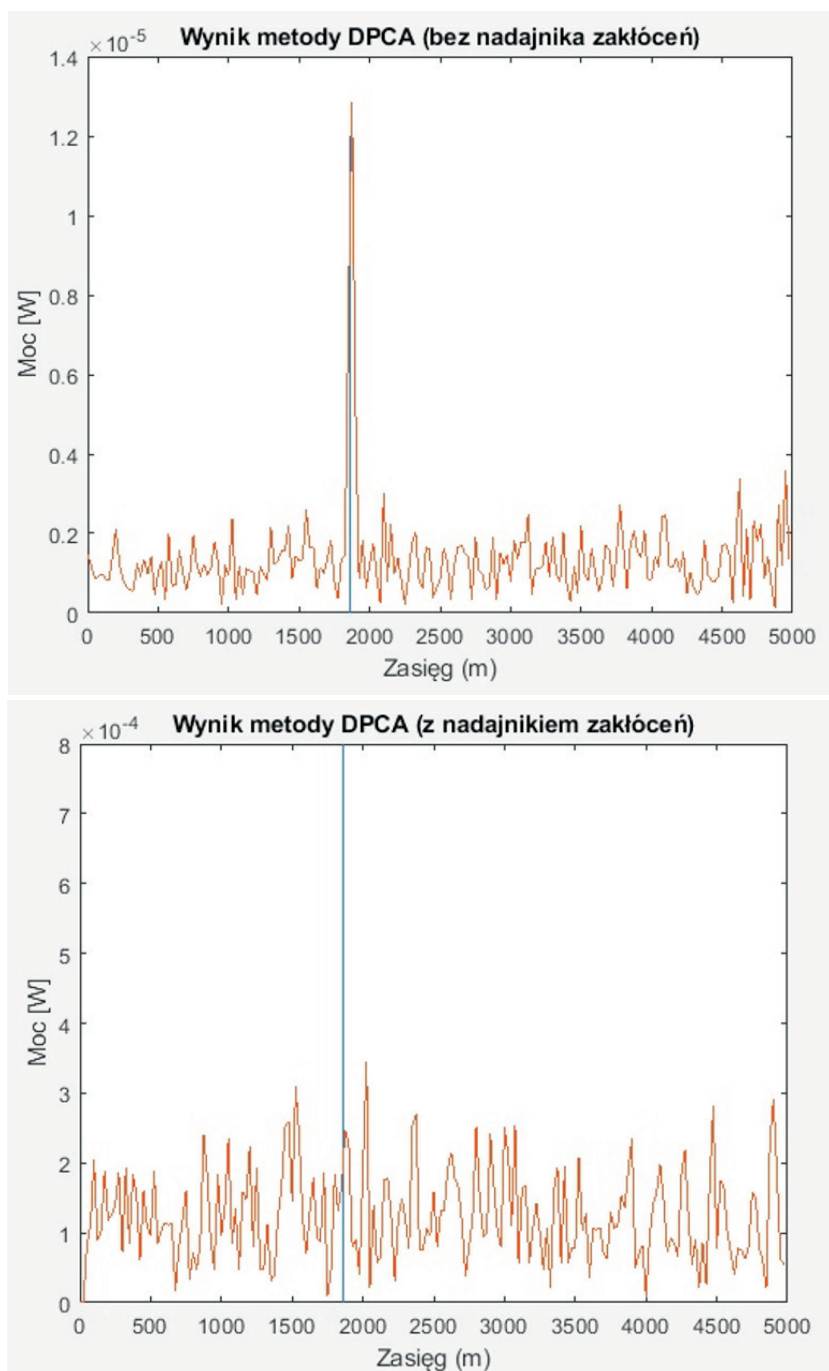
Na podstawie kolejnego rysunku, na którym pokazano możliwość wykrycia obiektu przy zastosowaniu algorytmu DPCA na tle zakłóceń aktywnych oraz tylko pasywnych (górny wykres), można stwierdzić, że w rzeczywistości obiekt znajduje się w odległości 1860 metrów od radaru.

Jak już wcześniej założono, algorytm DPCA wymaga spełnienia warunku poruszania się platformy latającej z radarem. W związku z tym stosowanie tego algorytmu ma pewne ograniczenia. Rysunek 6 pokazuje kolejną wadę algorytmu DPCA. Dotychczas analizowano wydajność algorytmu DPCA tylko w przypadku zakłóceń pasywnych. Niestety, algorytm DPCA nie potrafi dokładnie określić położenia obiektu na tle dodatkowego zakłócenia o charakterze aktywnym, co łatwo można zauważyć na dolnym wykresie na rysunku 6.

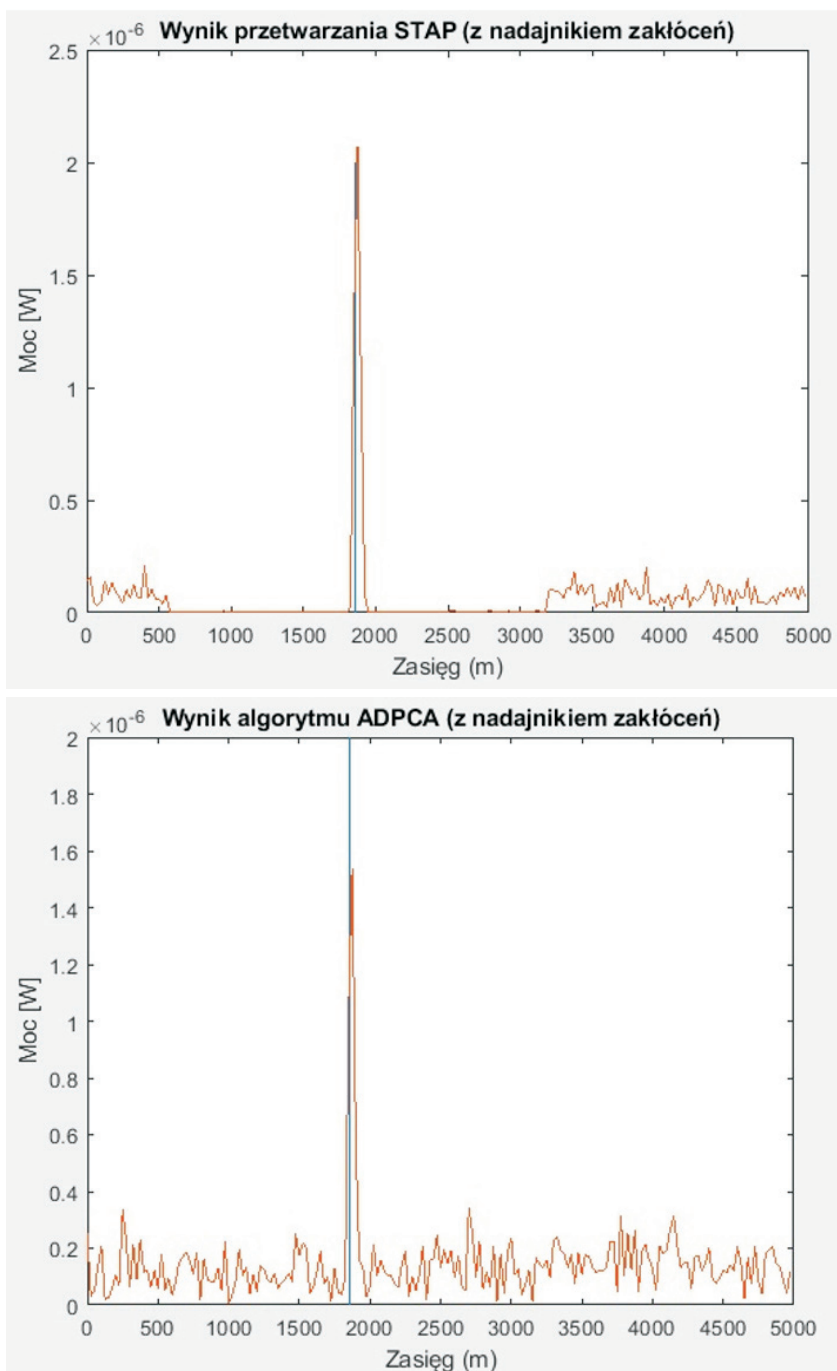
Dla algorytmu STAP, zgodnie z wcześniej przytoczonymi założeniami metody estymacji SMI, należało dodatkowo określić liczbę treningowych komórek odległościowych równą 100, po 50 z każdej strony komórki hipotetycznie zawierającej poszukiwany obiekt.

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 7, widać, że algorytm STAP oraz algorytm ADPCA potrafią odfiltrować pożądany sygnał, wyłumić zarówno zakłócenia aktywne, jak i pasywne. Algorytm ADPCA, którego wyniki przedstawiono na dolnym wykresie na rysunku 7, wykrył obiekt, skutecznie odfiltrował zakłócenia, choć wartość sygnału odebranego przez platformę latającą jest mniejsza niż dla STAP. Poza tym STAP w porównaniu do ADPCA znacznie bardziej tłumi sumę zakłóceń.

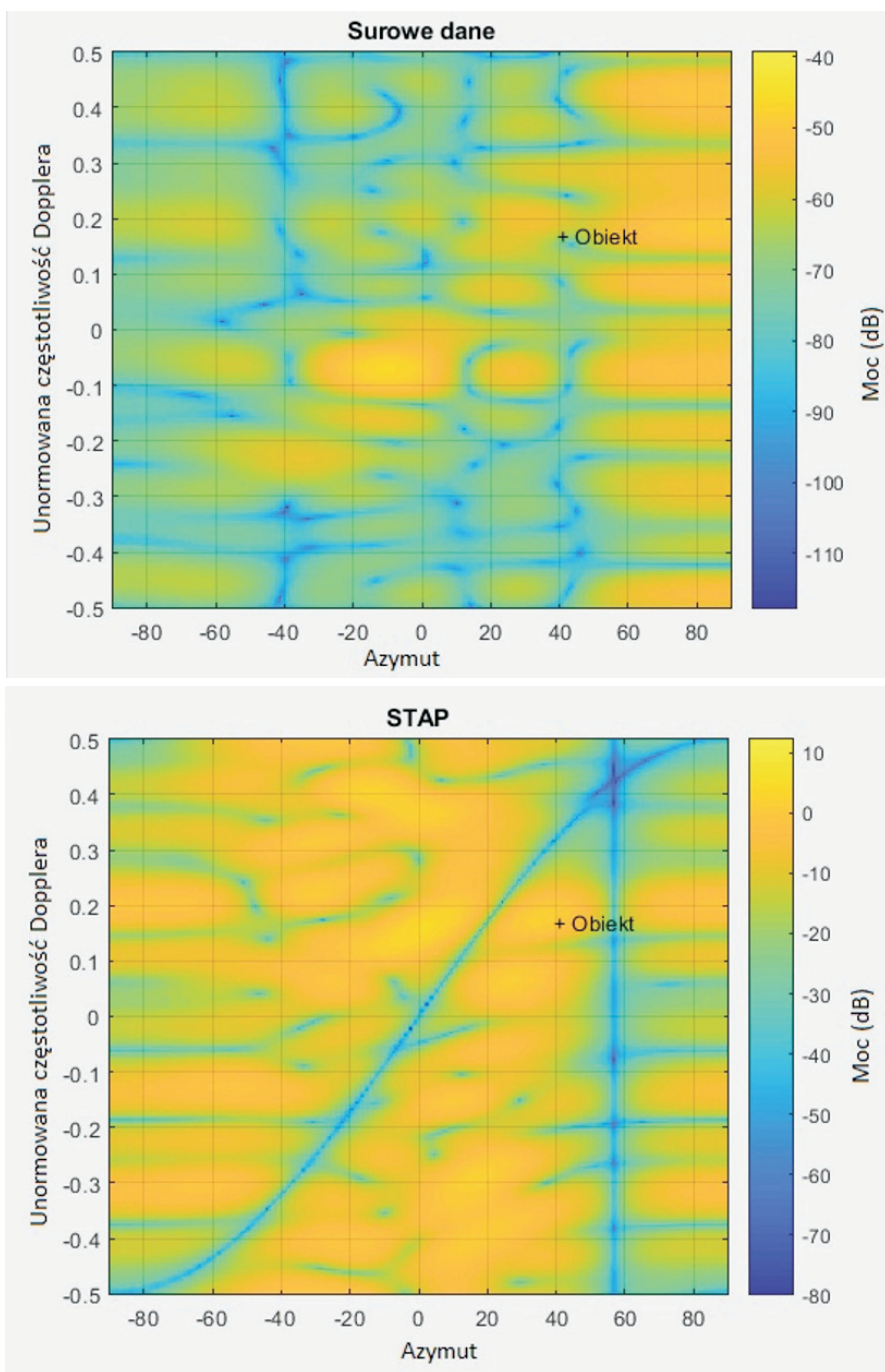
Na rysunku 8 przedstawiono echo odebranego sygnału przed przetwarzaniem STAP na płaszczyźnie przestrzenno-czasowej (górny wykres) oraz po przetworzeniu STAP (dolny wykres).



Rys. 6. Analiza metody DPCA na tle zakłóceń aktywnych



Rys. 7. Porównanie algorytmów STAP oraz ADPCA



Rys. 8. Estymacja macierzy kowariancji zakłóceń STAP

Jak można zauważyć na górnym wykresie powyższego rysunku, na tle całego odebranego echa trudno wskazać prawidłową lokalizację obiektu. Wynika to z faktu, że wartość sygnału od obiektu jest poniżej wartości sygnałów zakłóceń. Po zastosowaniu algorytmu STAP bazującego na statystycznej metodzie estymacji zakłóceń SMI, będącej wbudowanym modułem środowiska STAP, tak samo jak DPCA i ADPCA, możliwa stała się prawidłowa detekcja obiektu. Wartość sygnału od obiektu wyróżnia się i sięga 10 dB. Ponadto można zauważyć silną eliminację zakłóceń pochodzących od nadajnika zakłóceń — niebieski obszar wzdłuż kąta azymutu wynoszącego 60°, a także niebieski obszar będący przekątną dolnego wykresu. W literaturze przedmiotu ten drugi niebieski obszar, który mówi o silnej eliminacji zakłóceń pasywnych na każdej częstotliwości Dopplera, nazywany jest grzbietem zakłóceń (ang. *clutter ridge*). W poniższej tabeli zestawiono wyniki symulacji.

Tabela 2. Parametry otrzymane w wyniku symulacji

| Parametr | Wartość |
|---|--------------|
| Rozmiar kostki danych | 200 × 6 × 16 |
| Azymut obiektu względem radaru | 39,29° |
| Elewacja obiektu względem radaru | -40,18° |
| Odległość radar — obiekt | 1860 m |
| Azymut nadajnika zakłóceń względem radaru | 60° |
| Elewacja nadajnika zakłóceń względem radaru | 0° |
| Odległość radar — nadajnik zakłóceń | 2025 m |
| Wypadkowa prędkość radar — obiekt | 76,45 m/s |
| Przesunięcie częstotliwości Dopplera radar — obiekt | 5,1 kHz |
| Znormalizowana częstotliwość Dopplera | 0,17 |

Wnioski

Celem artykułu było przybliżenie algorytmu STAP szeroko stosowanego w radiolokacji. Omówiono przebieg algorytmu STAP bazującego na statystycznej metodzie estymacji macierzy kowariancji zakłóceń. Ponadto porównano i pokazano możliwości wykrycia obiektu za pomocą sześćoelementowego szyku antenowego bez przetwarzania przestrzenno-czasowego oraz z zastosowaniem techniki STAP i algorytmów DPCA, a także ADPCA.

Autorzy skupili swój wysiłek przede wszystkim na operacjach macierzowych, jakie zachodzą w poszczególnych etapach przetwarzania STAP, bez głębszej analizy struktury sygnałów sondujących czy postaci odpowiedzi kanału radarowego.

Za pomocą wbudowanych modułów oraz funkcji w środowisku MATLAB pokazano, że możliwe jest zamodelowanie obiektów, platformy latającej oraz zakłóceń, a następnie poznanie algorytmu STAP oraz jego szybka implementacja wykorzystująca metodę statystycznej estymacji kowariancji zakłóceń SMI. Ta wiedza może posłużyć do przeprowadzenia kolejnych badań nad algorytmami STAP, w tym do udoskonalania bądź wdrażania nowych metod estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, dla których odniesieniem może być metoda SMI.

Algorytm STAP bazujący na metodzie SMI ma jednak pewne ograniczenia wynikające z charakteru zakłóceń. Technika jest optymalna w przypadku, gdy zakłócenia mają charakter jednorodny. Co więcej algorytm ten wymaga ogromnej złożoności obliczeniowej oraz bardzo wydajnych procesorów przetwarzania sygnałów. Na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat przeprowadzono liczne badania, na podstawie których zweryfikowano nowe metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń. Obecnie wielu naukowców swoje badania prowadzi w kierunku zastosowania algorytmów rzadkiego odzyskiwania do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, które wykorzystują pojedynczy przekrój radarowej kostki danych.

Przedstawione w artykule opis techniki STAP oraz wyniki badań symulacyjnych mogą być wykorzystane w celu zwiększenia potencjału naukowego oraz mogą stać się wstępem do dalszych badań nad zastosowaniem techniki STAP.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 21.05.2020 r. Zatwierdzono do publikacji 10.06.2020 r.

Anna Ślesicka <https://orcid.org/0000-0002-6313-030X>

Adam Kawalec <https://orcid.org/0000-0003-3930-7504>

LITERATURA

- [1] KLEMM R., *Principles of space-time adaptive processing*, IEE Publishing, 2002.
- [2] PARKER M., *Radar Basics – Part 4: Space-time adaptive processing*, EETimes, 6, 28, 2011.
- [3] GUERCI J.R., *Space-Time Adaptive Processing for Radar*, Artech House Publishers, 2003.
- [4] WARD J., *Space-time adaptive processing for airborne radar*, Technical Report No. 1015, MIT Lincoln Laboratory, December 1994.
- [5] MELVIN W.L., *A STAP overview*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 19–53, January 2004. Part 2 – Tutorials.
- [6] BLUM R.S., MELVIN W.L., WICKS M.S., *An analysis of adaptive DPCA*, Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference, 06 August 2002.
- [7] GÓRSKI T., *Space-Time Adaptive Signal Processing for Sea Surveillance Radars*, Doctoral thesis 2008.
- [8] LE CAILLEC J.M., GÓRSKI T., SICOT G., KAWALEC A., *Theoretical Performance of Space-Time Adaptive Processing for Ship Detection by High-Frequency Surface Wave Radars*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 43, no. 1, January 2018.
- [9] CHAPARRO F.L., AKAN A., *Signals and systems using MATLAB*, 2019.

A. ŚLESICKA, A. KAWALEC

Comparison of the performance of adaptive space-time processing against the background of alternative methods

Abstract. Description and successive stages of the STAP algorithm were characterized in this article. The ability to detect an object by using 6-element antenna array without space-time processing and using the STAP technique were compared and shown. The simulation results showed that the implemented STAP algorithm successfully coped with target detection. In addition, the possibilities of object detection using the STAP technique were compared and shown against the background of other DPCA and ADPCA algorithms

Keywords: space-time adaptive processing, STAP, DPCA, ADPCA, radar signal processing, radar.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.5649