

Innowacje koncepcyjno-technologiczne w zakresie niewykrywalności współczesnych samolotów bojowych przez radar

Hubert Górski

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

W artykule omówiono technologie wykorzystywane we współczesnych samolotach bojowych, które ograniczają podatność na wykrycie przez radar. Przedstawiono szereg metod, za pomocą których jest to realizowane. Zestawiono rodzaje materiałów dawniej stosowanych do tego celu oraz te wykorzystywane i rozwijane obecnie. Omówiono też perspektywy użycia tych materiałów w przyszłości. Przeanalizowano konieczność rozwoju technologii zmniejszania echa radarowego w kontekście zmieniających się realiów pola bitwy.

Słowa kluczowe: materiały, radar, fale, odbicie, absorpcja, wojsko

Wprowadzenie

Realia dzisiejszego pola walki zmuszają konstruktorów samolotów bojowych do stosowania coraz wydajniejszych metod zabezpieczających przed ich wykrywaniem, głównie z pomocą radarów. Na przykładzie współczesnych konfliktów zbrojnych wykorzystujących lotnictwo (np. niedawne starcia powietrzne w konflikcie indyjsko-pakistańskim) widać, że kończą się czasy walk manewrowych na niewielkich odległościach, gdzie liczy się prędkość i zwrotność, a wzrasta znaczenie walk na duże odległości z wykorzystaniem pocisków naprowadzanych dalekiego zasięgu. Sprawia to, że zmniejszenie echa radarowego samolotu daje ogromną przewagę, bo pozwala wykryć przeciwnika, samemu pozostając niezauważonym, i zaatakować z zaskoczenia z dużej odległości [1].

Radary wykorzystywano do wykrywania samolotów już w czasach II wojny światowej. Już wtedy podejmowano również pierwsze próby zmniejszania echa radarowego, m.in. poprzez zastosowanie farb ferrytowych, którymi pokrywano głównie powierzchnie okrętów podwodnych. W tamtym okresie farby tego typu nie były powszechnie używane w lotnictwie.

W przypadku samolotów wczesne sposoby na unikanie radarów przeciwnika obejmowały głównie operowanie na bardzo dużej wysokości i z bardzo dużą prędkością. Przykładami maszyn mogących zrealizować taki lot są SR-71 Blackbird i MiG-31 [2]. Szczególnie intensywne prace nad technologią pozwalającą bezpośrednio zmniejszyć echo radarowe samolotów bojowych rozpoczęły się w latach 70. XX w. wraz z powstaniem samolotu Lockheed F-117 Nighthawk (ryc. 2), który został ukończony i oblatany

w latach 80. XX w. [3], [4]. We współczesnych samolotach bojowych stosuje się dwie główne metody zmniejszania echa radarowego, które są stale rozwijane. Przede wszystkim wykorzystuje się zjawisko odbicia fali. Powierzchnie samolotu kształtuje się tak, aby odbijały fale radarowe w przewidywalny sposób, w kierunku innym niż źródło sygnału, czyli sam radar, do którego fala musi wrócić, aby samolot został wykryty. Drugim sposobem jest absorpcja fal i przekształcanie ich w inny rodzaj energii.

Działanie radaru

Radar to urządzenie służące do wykrywania obiektów oraz określania ich lokalizacji i ruchu z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych. Nazwa „RADAR” pochodzi od angielskiego skrótu *Radio Detection And Ranging*, czyli „radiowe wykrywanie i pomiar odległości”. Jego działanie opiera się na współpracy kilku podstawowych bloków technicznych, takich jak nadajnik, antena, odbiornik oraz układ przetwarzania sygnału. Nadajnik generuje sygnał radarowy w postaci krótkich impulsów o wysokiej mocy lub sygnału ciągłego. Stąd wyróżnia się radary wysyłające pojedyncze impulsy (*pulsed operation*) i radary pracujące w trybie ciągłym (*continuous wave*). Sygnał ten jest przekazywany do anteny, która formuje wiązkę elektromagnetyczną i wysyła ją w określonym kierunku. Fale radarowe, będące falami



Ryc. 1. Radar wczesnego ostrzegania wykorzystywany przez RAF w czasach II wojny światowej (źródło: <https://www.worldhistory.org/image/18878/chain-home-radar-towers/>)



Ryc. 2. Samolot F-117 Nighthawk wyróżniający się płaskimi, pochylonymi powierzchniami służącymi odbijaniu fal radarowych (źródło: Peter R. Foster, <https://www.key.aero/article/going-war-f-117-pilots-perspective>)

elektromagnetycznymi, rozchodzą się z prędkością światła i po napotkaniu obiektu ulegają częściowemu odbiciu, a odbita fala trafia do anteny odbiornika. W radarach monostatycznych ta sama antena jednocześnie nadaje i odbiera sygnał, natomiast w przypadku radarów bistatycznych wykorzystywane są osobne anteny nadawcze i odbiorcze, które mogą znajdować się w innych miejscach. Po odebraniu sygnału przez antenę odbiorczą odbiornik wzmacnia sygnał echa, filtruje go w celu ograniczenia zakłóceń oraz przekształca do postaci umożliwiającej dalszą analizę. Na podstawie czasu opóźnienia pomiędzy wystąpieniem impulsu a odebraniem echa system radarowy wyznacza odległość do obiektu, z kolei kierunek, z którego sygnał został odebrany, zależy od aktualnego położenia i charakterystyki kierunkowej anteny. Zmiana częstotliwości sygnału odbitego, wynikająca z efektu Dopplera, pozwala określić prędkość obiektu. Istotnym pojęciem związanym z działaniem radarów jest skuteczna powierzchnia odbicia radarowego, określana angielskim terminem *Radar Cross Section* (RCS), która opisuje, jak widoczny jest dany obiekt dla radaru. RCS nie jest fizyczną powierzchnią geometryczną obiektu, lecz wielkością umowną, wyrażaną najczęściej w metrach kwadratowych, zależną od wielu czynników, takich jak rozmiar obiektu, jego kształt, materiał, orientacja względem anteny radarowej oraz częstotliwość pracy radaru. Przykładowo, duży samolot transportowy może mieć skuteczną powierzchnię odbicia rzędu kilkudziesięciu lub nawet kilkuset metrów kwadratowych, myśliwiec bojowy kilku metrów kwadratowych, natomiast obiekty o obniżonej wykrywalności, projektowane w technologii *stealth*, mogą charakteryzować się RCS poniżej

0,1 m². Im większa wartość RCS, tym silniejsze echo wraca do odbiornika i tym łatwiejsza jest detekcja obiektu na dużych odległościach, natomiast mała skuteczna powierzchnia odbicia powoduje znaczne osłabienie sygnału powrotnego i skrócenie zasięgu wykrycia. RCS zależy też od długości fali odbitej od obiektu, ponieważ obiekt może inaczej odbijać fale o długości kilkudziesięciu centymetrów niż fale o długości kilku centymetrów, co sprawia, że ten sam cel może być dobrze widoczny dla jednego pasma radarowego, a znacznie gorzej dla innego [5].

Tabela 1. Skuteczna powierzchnia odbicia radarowego przykładowych obiektów [3]

Obiekt	RCS (m ²)
B-52	100–125
F-16A	5
B-2	0,1
F-117A	0,025
Ptak	0,01
F-35	0,0015–0,005
Owad	0,001
F-22	0,0001–0,0005



Ryc. 3. Northrop B-2 Spirit. Pozbawienie samolotu statecznika pionowego pozwoliło znacznie ograniczyć echo radarowe (źródło: <https://www.defenseindustrydaily.com/usas-b2-bombers-leading-the-way-in-contracting-for-availability-02950/>)



Ryc. 4. Spód samolotu Su-57. Widoczne wewnętrzne komory uzbrojenia w pozycji otwartej (źródło: <https://www.twz.com/air/su-57-felon-brandishes-its-loaded-weapons-bays-for-the-first-time>)

Odbicie

Odpowiednie ukształtowanie powierzchni jest podstawowym sposobem na polepszenie niewykrywalności przez radar. Działanie radaru opiera się na wysłaniu wiązki fali elektromagnetycznej, która ma za zadanie odbić się od samolotu i wrócić do miejsca, z którego została wyemitowana. Jako że w typowym przypadku wiązka fali radarowej wysłana z radaru będzie padać na samolot pod kątem niemal równoległym do horyzontu lub z kierunku trochę poniżej horyzontu, głównymi powierzchniami, które odbijają fale pod kątem umożliwiającym wykrycie są stateczniki pionowe oraz bok kadłuba. Powierzchnię samolotu można porównać do lustra. Jeśli powierzchnia lustra jest ustawiona względem

obserwatora prostopadle, to obserwator zobaczy w nim swoje odbicie, jeśli natomiast zostanie obrócone o pewien kąt, odbicie obserwatora nie będzie widoczne. Podobna zasada jest warunkiem wykrycia samolotu przez radar, który musi „zobaczyć swoje odbicie” w samolocie. Z tego powodu w maszynach o obniżonej wykrywalności stosuje się pochylone stateczniki pionowe lub nawet całkowicie się z nich rezygnuje, tak jak w bombowcu B-2 Spirit (ryc. 3). Kadłub formuje się w taki sposób, aby wszystkie powierzchnie były nachylone pod pewnym kątem do pionu, co jest szczególnie widoczne w przypadku wcześniej wspomnianego samolotu F-117 Nighthawk. Z podobnych względów większość współczesnych myśliwców ma skrzydła mocno zintegrowane z kadłubem, bez wyraźnej granicy pomiędzy

tymi elementami. Poza korzyściami aerodynamicznymi takie rozwiązania zmniejszają prawdopodobieństwo, że wiązka odbita od kadłuba zostanie skierowana w stronę skrzydła, a następnie w stronę źródła wiązki. Niezbędne jest także ukrycie wszelkiego uzbrojenia w komorach wewnątrz kadłuba. Wszystkie nieregularne kształty i wystające elementy mogą zawierać powierzchnie, które odbijają potencjalną wiązkę w kierunku jej źródła. Istotne jest też pozbycie się regularnych kształtów kulistych, ponieważ kula obserwowana z dowolnego punktu jest identyczna i zawsze zawiera jeden fragment powierzchni nachylony do obserwatora pod kątem 90° . Mimo że jest on teoretycznie nieskończenie mały, ułatwia to jego wykrycie przez radar. Poza tym takich fragmentów jest nieskończenie wiele, a każdy nachylony jest pod innym kątem, przez co kulisty kształt jest widoczny dla radaru z dowolnej strony [2].

Odbicie fali może być skuteczną metodą uniknięcia wykrycia przez radar, jednak ma pewne ograniczenia. Wymaga podporządkowania kształtu kadłuba założeniom pozwalającym ograniczyć wykrywalność, które nie zawsze idą w parze z założeniami aerodynamicznymi i utrudniają wyposażenie samolotu w uzbrojenie. Należy także wziąć pod uwagę, że w niektórych sytuacjach powierzchnie zaprojektowane tak, aby przekierować wiązkę, znajdują się w położeniu prostopadłym względem radaru i staną się nieskuteczne. Trzeba również pamiętać, że radary często współpracują jako sieć wielu obiektów rozmieszczonych w dużych odległościach od siebie i wiązka wysłana z jednego radaru może odbić się od samolotu, po czym zostać odebrana przez stację położoną w innym miejscu [3]. Projektowanie trudnego do wykrycia samolotu jest zatem grą kompromisów, w której oprócz metod polegających na odbiciu fali stosuje się dodatkowo inne rozwiązania.

Pochłanianie

Drugim sposobem na sprawienie, by wiązka wysłana z radaru nie powróciła do niego i obecność samolotu nie została zarejestrowana, jest pochłonięcie fali. W tym celu stosuje się materiały lub farby zdolne do absorbowania fal elektromagnetycznych nazywane RAM (z ang. *Radiation Absorbing Materials*). Fala taka jest nośnikiem energii i gdy natrafia na jakąś powierzchnię, zostaje pochłonięta lub odbita. Stosując analogię do światła widzialnego, które jest przecież tym samym rodzajem fali, można powiedzieć, że materiały pochłaniające działają jak czarna farba, tyle że dla zakresu długości fal stosowanych w technice radarowej. Najstarszym, choć oczywiście udoskonalonym w stosunku do pierwszych wersji, rodzajem takiego materiału jest wspomniana już farba ferrytowa. Zawiera ona cząsteczki żelaza karbonylowego lub innych materiałów ferromagnetycznych, które pod wpływem działania fali elektromagnetycznej drgają, zamieniając energię fali na energię mechaniczną, która następnie jest rozpraszana w postaci ciepła [3]. Jako materiały pochłaniające fale emitowane przez systemy radarowe stosuje się także niektóre kompozyty z włókna węglowego. Mają one tę zaletę, że są także

dobrym materiałem konstrukcyjnym i nadają się do budowy elementów strukturalnych przenoszących obciążenia, co daje im przewagę nad farbą, która jedynie zwiększa masę samolotu [2]. Zastosowanie kompozytów złożonych z włókien, które są trwalsze od farby, pozwala również zmniejszyć czas niezbędny na serwis podczas obsługi technicznej. Samolot mniej czasu spędza na ziemi, co bezpośrednio przekłada się na możliwość wykorzystania go w boju [3]. Materiały bazujące na węglu to m.in. te, które wykorzystują grafit, grafen oraz, tańsze od grafenu, nanorurki węglowe. Pewnego rodzaju innowacją w zakresie niewykrywalności przez radar są metamateriały, czyli „sztucznie wytwarzane struktury o ściśle określonych właściwościach elektromagnetycznych, zbudowane z wielu identycznych jednostek tworzących sieci jedno-, dwu- lub trójwymiarowe. Są one strukturami w znacznym stopniu przypominającymi naturalne kryształy, przy czym rolę atomów lub molekuł odgrywają tu owe jednostki – komórki elementarne w postaci miniaturowych obwodów rezonansowych wykonanych z metalu. Obwody te składają się najczęściej z prostych rezonatorów oddziałujących ze zmiennym polem magnetycznym i prostoliniowych przewodników odpowiedzialnych za ich plazmopodobne zachowanie się w zmiennym polu elektrycznym. Makroskopowe właściwości elektromagnetyczne metamateriałów, podobnie jak substancji naturalnych, określone są przez przenikalności – elektryczną i magnetyczną, które w ogólności są funkcjami zespolonymi i zależą od częstotliwości pola. Istotną cechą metamateriałów jest to, że ich parametry elektromagnetyczne mogą być dobierane dość swobodnie poprzez zmianę kształtu i wymiarów mikroobwodów” [6]. Metamateriały wzbudziły duże zainteresowanie ze względu na szereg niespotykanych właściwości, m.in. ujemny współczynnik załamania fal elektromagnetycznych. Sprawia on, że fale elektromagnetyczne załamujące się na granicy ośrodków, zgodnie z prawem Snella, załamują się w przeciwnym kierunku względem tego, w którym załamują się fale w materiale o współczynniku dodatnim. Innym, wartym uwagi z perspektywy przemysłu zbrojeniowego efektem, uzyskiwanym dzięki zastosowaniu metamateriałów, jest odwrócony efekt Dopplera. Gdy obiekt, od którego odbija się fala, zbliża się do źródła tej fali, częstotliwość fali odbitej staje się większa. Efekt ten jest trudny do osiągnięcia, ale został udowodniony eksperymentalnie. Potencjalnie zastosowanie metamateriału w samolocie bojowym może więc, oprócz zmniejszenia prawdopodobieństwa wykrycia, zmylić radary wykorzystujące efekt Dopplera co do kierunku lotu, znajduje więc zastosowanie nawet jeśli nie spełnia swojej podstawowej funkcji [7].

Połączenie dwóch metod

Oprócz oczywistej możliwości równoległego zastosowania specjalnie dobranego kształtu powierzchni umożliwiającego odbicie fali oraz materiałów wykorzystujących zjawisko absorpcji, dostępne są także rozwiązania łączące obie techniki tak, aby jeszcze bardziej spotęgować efekt ich działania. Materiały RAM, choć skuteczne, nie zapewniają

całkowitego zaabsorbowania fal elektromagnetycznych przy pierwszym kontakcie, ale zmuszenie fali do przebycia jak najdłuższej drogi przez materiał absorbujący pozwala skutecznie pozbawić ją resztek energii. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu odpowiedniego kształtu, np. klinów wykonanych ze standardowych materiałów, i wypełnieniu pustych miejsc między klinami materiałem absorbującym. Fala odbija się wielokrotnie pomiędzy nachylonymi powierzchniami, wytracając jednocześnie energię z uwagi na znajdowanie się w materiale silnie absorbującym. Całość można przykryć od zewnątrz materiałem przenikalnym dla fal o częstotliwości przewidzianej jako ta, która będzie wykorzystywana przez radar. Pozwala to uzyskać gładką, spełniającą wymagania aerodynamiczne powierzchnię. Inną metodą jest nałożenie na siebie dwóch warstw materiałów o różnych właściwościach. Warstwa zewnętrzna może być wykonana z materiału, który częściowo przepuszcza falę, a częściowo ją odbija. Grubość tej warstwy odpowiada połowie długości fali. Warstwa wewnętrzna całkowicie odbija falę. Sprawia to, że wiązka, która przeniknie przez pierwszą warstwę i odbije się od warstwy wewnętrznej, spotka się z falą odbitą od warstwy zewnętrznej w przeciwfazie. To zaś spowoduje wzajemne wygaszenie obu wiązek. Wadą tego rozwiązania jest skuteczne działanie tylko dla określonych długości fali [2]. Znaczenie ma też kąt padania wiązki, który zmienia rzeczywistą odległość, jaką musi przebyć wiązka w warstwie zewnętrznej, zmieniając tym samym to, jaka długość fali zostanie wygaszona.

Podsumowanie

Rozwiązania techniczne w zakresie niewykrywalności przez radar stanowią w realiach dzisiejszego pola walki ważny aspekt rozwoju techniki wojskowej. Stopniowa zmiana charakteru walk powietrznych ze starć na małych odległościach, z wykorzystaniem dynamicznych manewrów wymagających zwrotności, na rzecz długodystansowych konfrontacji z użyciem uzbrojenia o dużym zasięgu rażenia (gdzie liczy się to, kto zdąży pierwszy wykryć przeciwnika i strzelić) napędza rozwój nowych technologii opóźniających moment wykrycia samolotu przez radar nieprzyjaciela. Technologie wykorzystujące powłoki absorbujące, choć znane od czasów

II wojny światowej, zdają się dynamicznie rozwijać i to one najprawdopodobniej będą stanowić przyszłość rozwoju lotnictwa wojskowego w tym aspekcie. Szczególnie obiecujące mogą być powłoki wykorzystujące metamateriały. Ich możliwości są wciąż rozwijane, a granice potencjału tych powłok nie są jeszcze znane. Warto pamiętać, że dostęp do najświeższej wiedzy odnoszącej się do omawianej tematyki jest zapewne mocno ograniczony, ponieważ wiele szczegółów technicznych dotyczących tego rodzaju technologii to informacje z oczywistych względów niejawne. W związku z tym większości ludzi nieznana jest nie tylko przyszłość omawianych technologii, ale także stan obecny. Informacje na temat dzisiejszych odkryć w tej dziedzinie będą zapewne powszechnie dostępne dopiero za wiele lat.

Bibliografia:

- [1] Kostis, T.G. (2025). The future of stealth military doctrine. *Joint Force Quarterly*. 116, 132–140. <https://digitalcommons.ndu.edu/joint-force-quarterly/vol116/iss4/19/>.
- [2] Kapur, V. (2014). *Stealth technology and its effect on aerial warfare*. Institute for Defence Studies and Analyses. New Delhi. ISBN: 978-93-82169-34-5 <https://catalog.princeton.edu/catalog/9996082723506421#view>.
- [3] Harmsel, J. (2023). Stealth on Aircraft; A Literature Review. University of Twente. https://www.researchgate.net/publication/375462852_Stealth_on_Aircraft_A_Literature_Review.
- [4] Jha, B.K., Aswale, M.S. (2016). Mechanical Aspects in Stealth Technology: Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 4(4), 21–27. https://www.erpublication.org/published_paper/IJETRO41555.pdf.
- [5] Showman, G. (2011). *Radar Fundamentals*. 12th Annual International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, Colorado, USA.
- [6] Wolarz, E. (2007). Metamateriały – nowe zastosowania elektrodynamiki. *Postępy Fizyki*, 58(6), 242–249. <https://www.ptf.net.pl/PF58/6>.
- [7] Ioannou, K., Koukos, I. (2018). Metamaterials and stealth technology. 7th International Conference on "Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization, Athens, 5–8 July 2017. https://www.researchgate.net/publication/322686878_METAMATERIALS_AND_STEALTH_TECHNOLOGY.