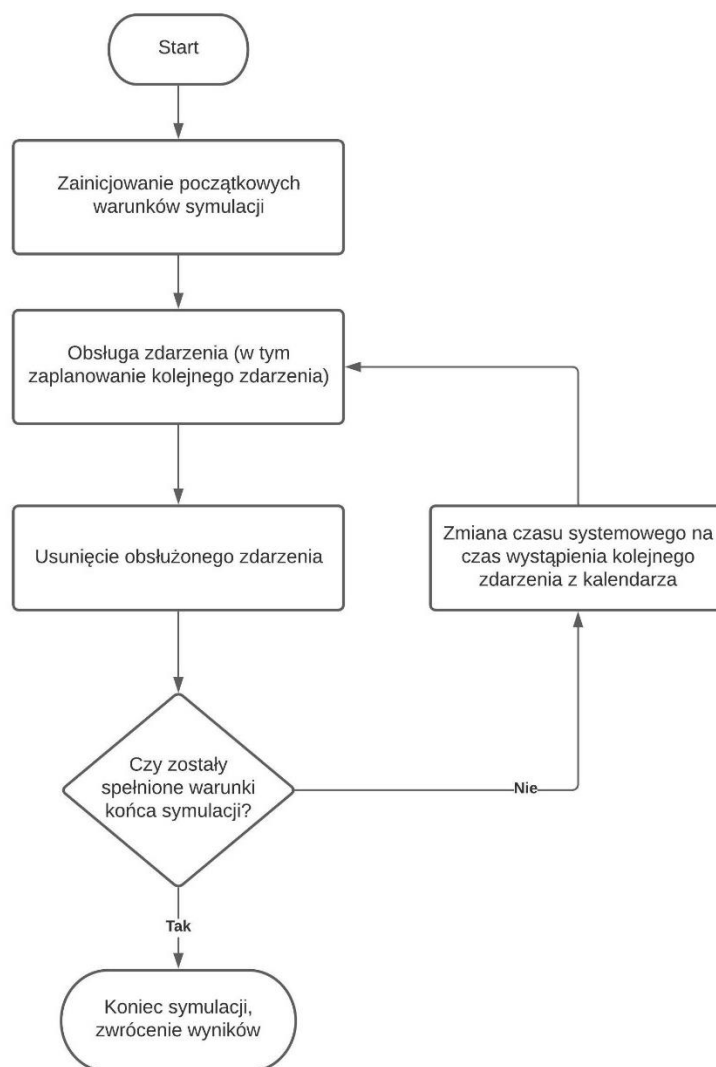


6. Badania symulacyjne

W celu przebadania długotrwałego zachowania się systemu, w którym koegzystuje sieć Wi-Fi™ i radar meteorologiczny została wykonana symulacja cyfrowa. Program został napisany w języku programowania C++. Wykorzystana w symulacji jest metoda planowania zdarzeń, która polega na obsłudze obecnego zdarzenia (w trakcie obsługi zazwyczaj dochodzi do zaplanowania kolejnego zdarzenia), usunięciu go z kalendarza zdarzeń, a następnie na zmianie czasu systemowego na czas kolejnego zdarzenia. Procedura jest powtarzana aż do czasu zakończenia symulacji (czyli spełnieniu konkretnego warunku, np. upływu odpowiedniego czasu systemowego lub obsłudze określonej liczby zdarzeń) [21]. Zastosowano tę metodę, ponieważ wszystkie wydarzenia pojawiające się w symulacji są wydarzeniami czasowymi, więc będą obsługiwane zgodnie z czasem wystąpienia. Schemat blokowy metody planowania zdarzeń przedstawia rysunek 6.1.

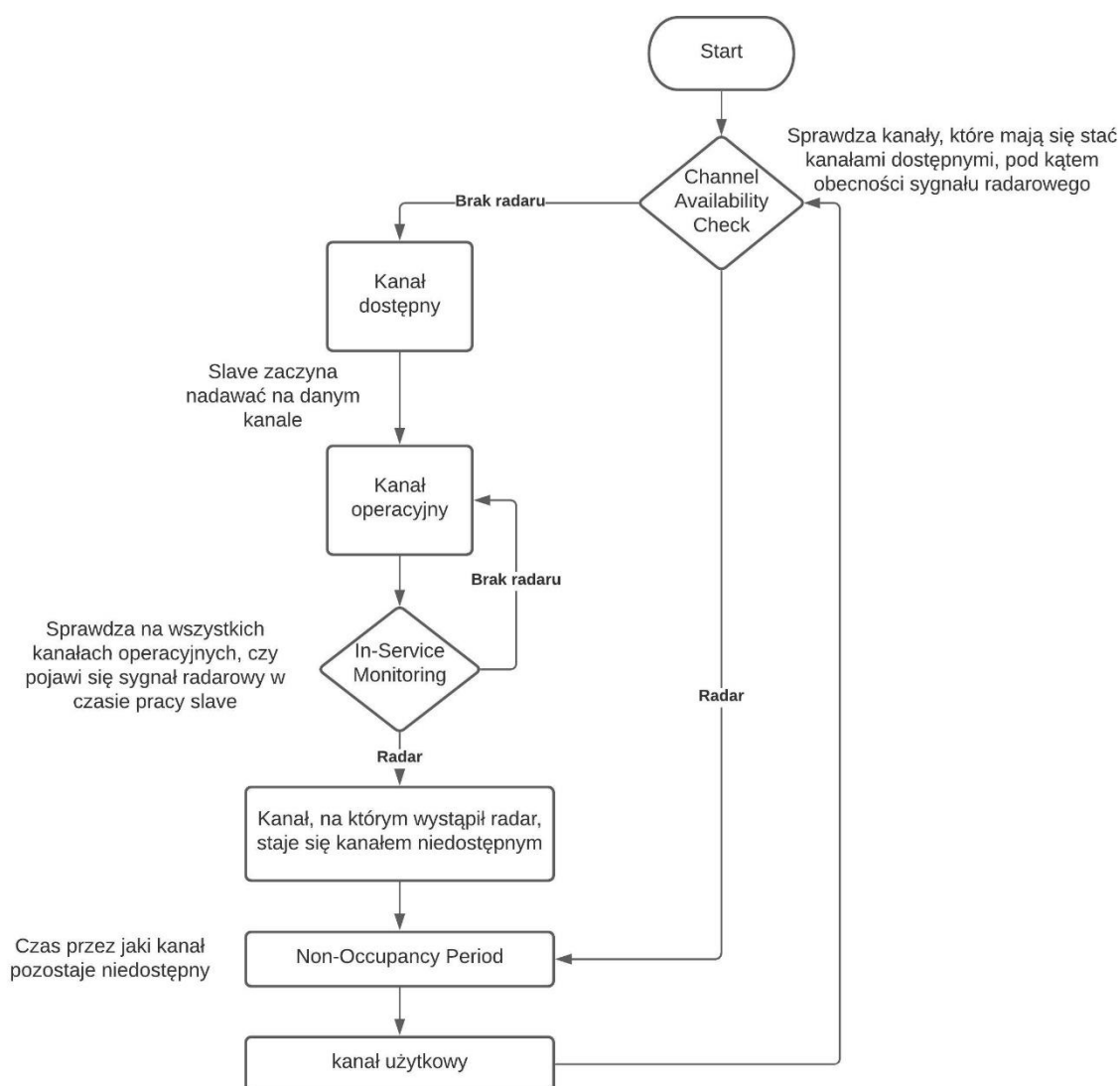


Rys. 6.1. Schemat blokowy metody planowania zdarzeń

Została wykorzystana kolejka jako kalendarz zdarzeń, ponieważ w kalendarzu nie będzie się znajdowała zbyt duża liczba zdarzeń (zazwyczaj około 10 zdarzeń), więc będzie to wydajny sposób.

6.1. Założenia symulacyjne

Sposób działania symulacji został oparty na standardzie ETSI EN 301 893 v2.1.1 (2017-05) [15], który opisuje działanie sieci Wi-Fi™ na częstotliwości 5 GHz. Został on szczegółowo opisany w rozdziale 4. W symulacji pominięto procedurę Off-Channel CAC, która jest opcjonalną procedurą w algorytmie DFS. Ponadto funkcjonalność CAC i Off-Channel CAC jest bardzo podobna. Czas symulacyjny został wyrażony w milisekundach. Najważniejszymi założeniami do realizacji jest zapewnienie detekcji sygnału radarowego na poziomie 99,99% dla procedury CAC i 60% dla In-Service Monitoring. Dodatkowo praca radaru musi być zgodna z danymi otrzymanymi od Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie. Rysunek 6.2 przedstawia schemat blokowy działania algorytmu DFS w symulacji.



Rys. 6.2. Schemat blokowy algorytmu DFS

Po uruchomieniu urządzenie zakłada, że wszystkie kanały są kanałami niedostępnymi, a aby możliwa była transmisja w kanale należy dla niego wykonać procedurę CAC. Jeśli w czasie trwania procedury CAC nie zostanie wykryty radar, to kanał staje się kanałem dostępnym, a następnie w momencie rozpoczęcia transmisji, w tym kanale, staje się on

kanalem operacyjnym. W momencie rozpoczęcia transmisji zostaje również uruchomiona procedura In-Service Monitoring, która sprawdza, czy na kanałach operacyjnych nie pojawił się sygnał radarowy. Jeśli sygnał radarowy nie zostanie wykryty, to transmisja może być nadal kontynuowana. W przypadku wykrycia radaru należy przerwać transmisję, ustawić kanał jako niedostępny, a następnie uruchomić procedurę Non-Occupancy Period, która zabroni transmisji na określoną ilość czasu opisaną w standardzie. Po zakończeniu procedury Non-Occupancy Period kanał staje się kanałem użytkowym i możliwe jest rozpoczęcie transmisji po wykonaniu procedury CAC. Jeśli podczas procedury CAC zostanie wykryty radar, to następuje ustawienie kanału jako kanał niedostępny i przejście do fazy oznaczonej jako Non-Occupancy Period.

6.2. Model propagacyjny

Podstawowym wymaganiem stawianym przed modelem propagacyjnym jest to, aby dobrze reprezentował środowisko pracy dla zadanej częstotliwości radarowej, w tym przypadku był to zakres 5600-5650 MHz. Model powinien także poprawnie uwzględniać odwzorowywanie terenu pracy radaru. W dokumencie IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.1. [22] przedstawiono kilka różnych modeli. Wybrany model do dalszych rozważań to model propagacyjny oznaczony jako C4, czyli przeznaczony dla transmisji z zewnątrz do wewnątrz w makrokomórce. Dla założonego środowiska pracy radar jest urządzeniem zewnętrznym, a Wi-Fi™ urządzeniem wewnętrznym. Jest to scenariusz dla środowiska miejskiego, który zakłada zarówno występowanie ścieżki bezpośredniej (LOS), jak i jej brak (NLOS). Przeznaczony jest dla prędkości rzędu 0-5 km/h i częstotliwości 2-6 GHz. Charakteryzuje się ona dodatkowo tym, że stacja bazowa (w tym przypadku radar) znajduje się nad poziomem dachów budynków, a większość urządzeń jest umieszczonych znacznie poniżej. Jest on połączeniem dwóch scenariuszy A1 i C2. Urządzenie wewnątrz pomieszczenia porusza się z bardzo niewielką prędkością, albo nie porusza się wcale. Wzór pozwalający wyznaczyć straty na ścieżce PL (ang. *pathloss*) wyraża się następująco:

$$PL = PL_{C2}(d_{out} + d_{in}) + 17,4 + 0,5d_{in} - 0,8h_{MS} , \quad (6.1)$$

gdzie d_{out} – odległość od nadajnika do ściany budynku, d_{in} – odległość od ściany budynku do odbiornika, h_{MS} – wysokość odbiornika (AP), PL_{C2} – strata dla scenariusza C2, którą można obliczyć z poniższego wzoru, występującego w dwóch wariantach. W przypadku, gdy występuje ścieżka bezpośrednia ma on postać: [22]

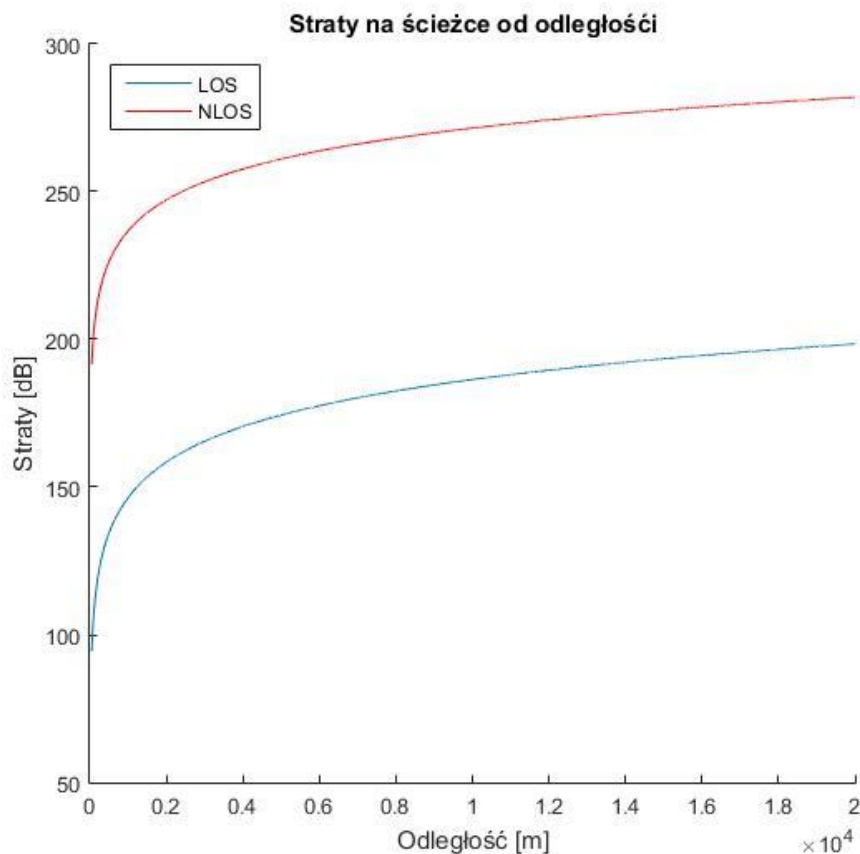
$$PL_{C2} = 40,0 \log_{10}(d) + 13,47 - 14,0 \log_{10}(h_{BS}) - 14,0 \log_{10}(h_{MS}) + 6,0 \log_{10}(f_c/5,0) , \quad (6.2)$$

a w przypadku braku bezpośredniej ścieżki wzór wygląda następująco [22]:

$$PL_{C2} = (44,9 - 6,55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34,46 + 5,83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5,0) , \quad (6.3)$$

gdzie: d – odległość stacji bazowej od urządzenia (odległość radaru od AP), h_{BS} – wysokość stacji bazowej (radaru), f_c – częstotliwość pracy.

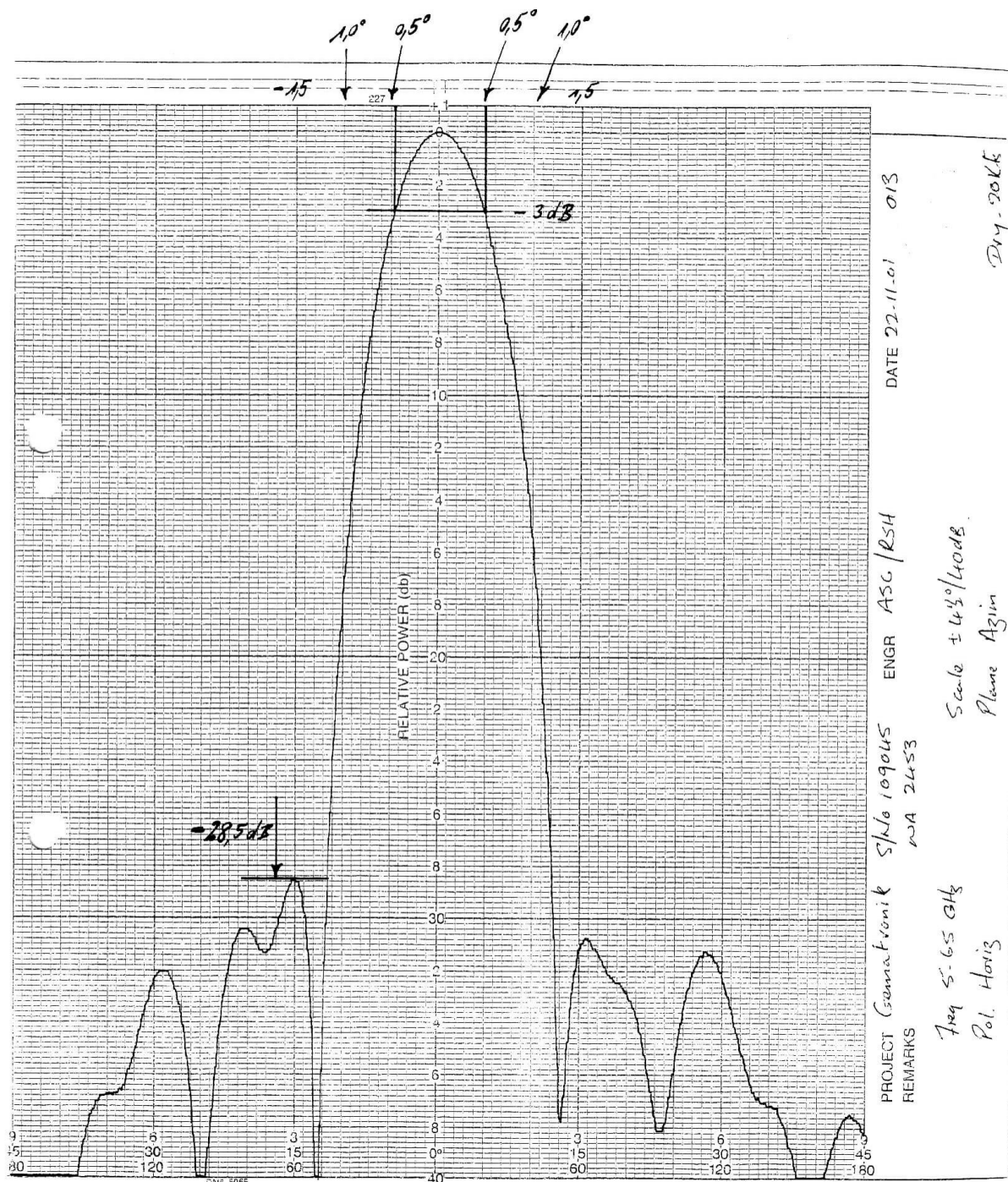
Wybrany model jest co prawda uproszczony, ale dla potrzeb symulacji jest wystarczający, ponieważ dobrze obrazuje straty mocy wraz z odległością. Rysunek 6.3. przedstawia wyniki, jakie zwraca metoda symulacyjna w zależności od odległości dla scenariuszy z LOS i NLOS.



Rys. 6.3. Wygenerowane straty na ścieżce w zależności od odległości

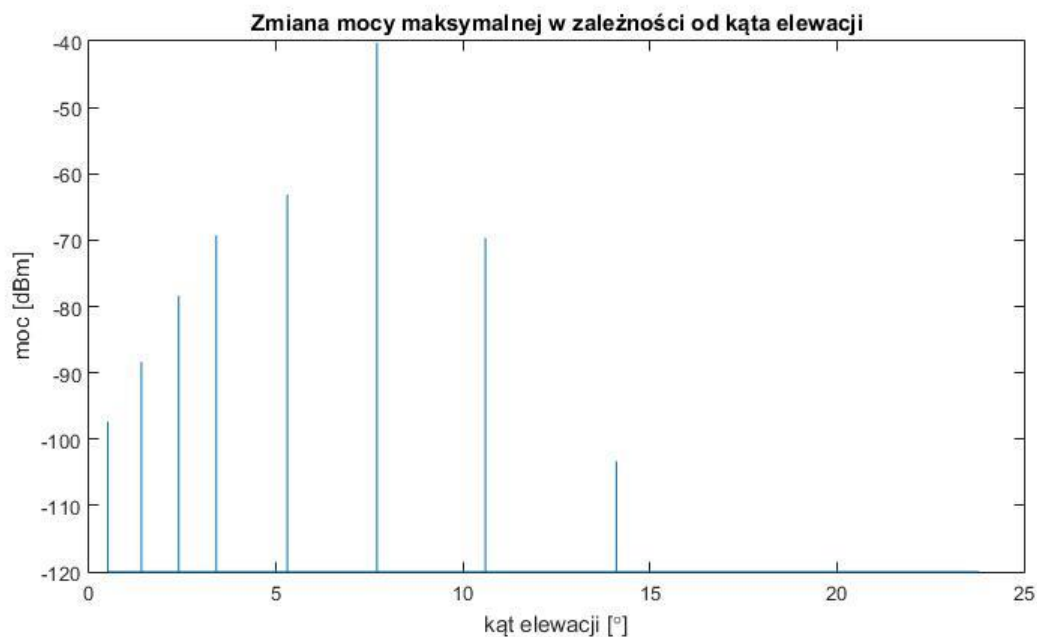
6.3. Symulacyjne działanie radaru

Ruch radaru w symulacji jest zgodny z ogólnym sposobem poruszania radaru opisanym w rozdziale 3. Najpierw następuje ruch horyzontalny wokół własnej osi, po czym następuje zwiększenie kąta elewacji i wykonanie kolejnego pełnego obrotu. Proces trwa przez 5 minut, w których następuje praca na 10 różnych kątach elewacji. Następnie radar wraca do początkowej wartości kąta elewacji i cały proces jest powtarzany. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej udostępnił charakterystykę anteny nadawczej, która jest przedstawiona na rysunku 6.4. Na osi poziomej znajdują się kąty odchylenia od osi głównej promieniowania anteny, na osi pionowej spadek mocy wyrażony w dB.



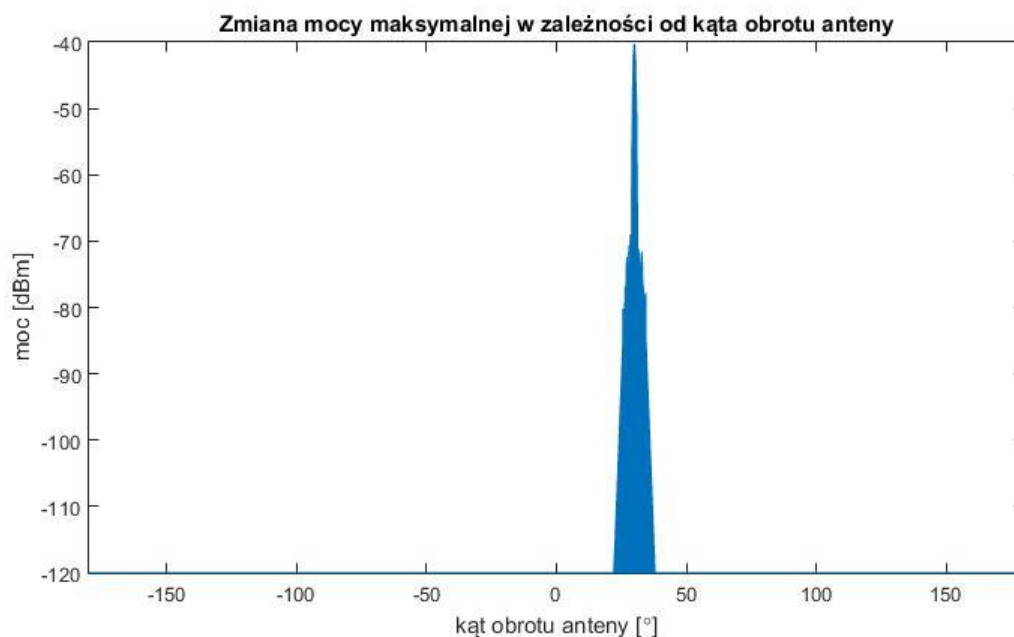
Rys. 6.4. Charakterystyka anteny nadawczej

Szerokość wiązki, dla której spadek mocy jest nie mniejszy niż 3 dB wynosi 1° , co oznacza, że nadawana wiązka jest wąska. Charakterystyka anteny wraz z ruchem zostały odwzorowane w symulacji. Rysunek 6.5 przedstawia zmianę mocy nadawanej wraz ze wzrostem kąta elewacji anteny. Odbiornik został ustawiony na kącie o współrzędnych 30° wychylenia poziomego i 7° wychylenia pionowego. W momencie, kiedy antena wskaże na ten punkt, moc będzie maksymalna.



Rys. 6.5. Zmiana mocy maksymalnej w zależności od kąta elewacji

Rysunek 6.6 przedstawia podobną zależność, ale przy zmianie kąta obrotu anteny. Pełen obrót wynosi 360° , więc oś x jest wyskalowana od -180° do 180° .

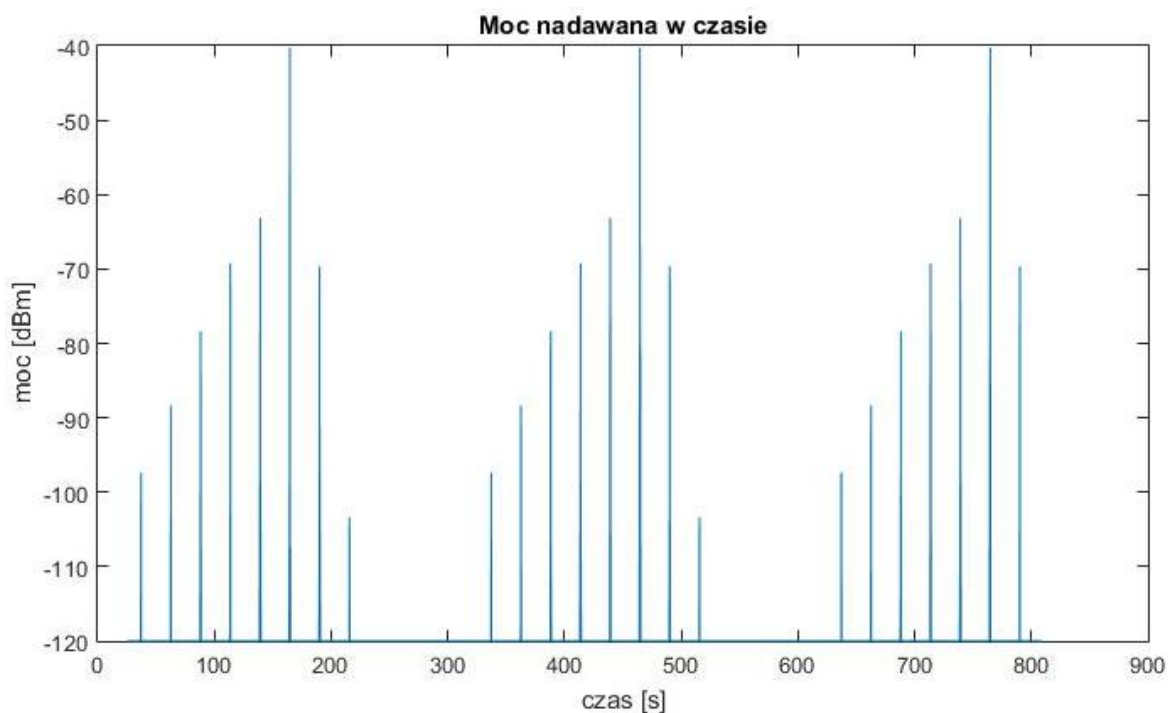


Rys. 6.6. Zmiana mocy maksymalnej w zależności od kąta obrotu anteny

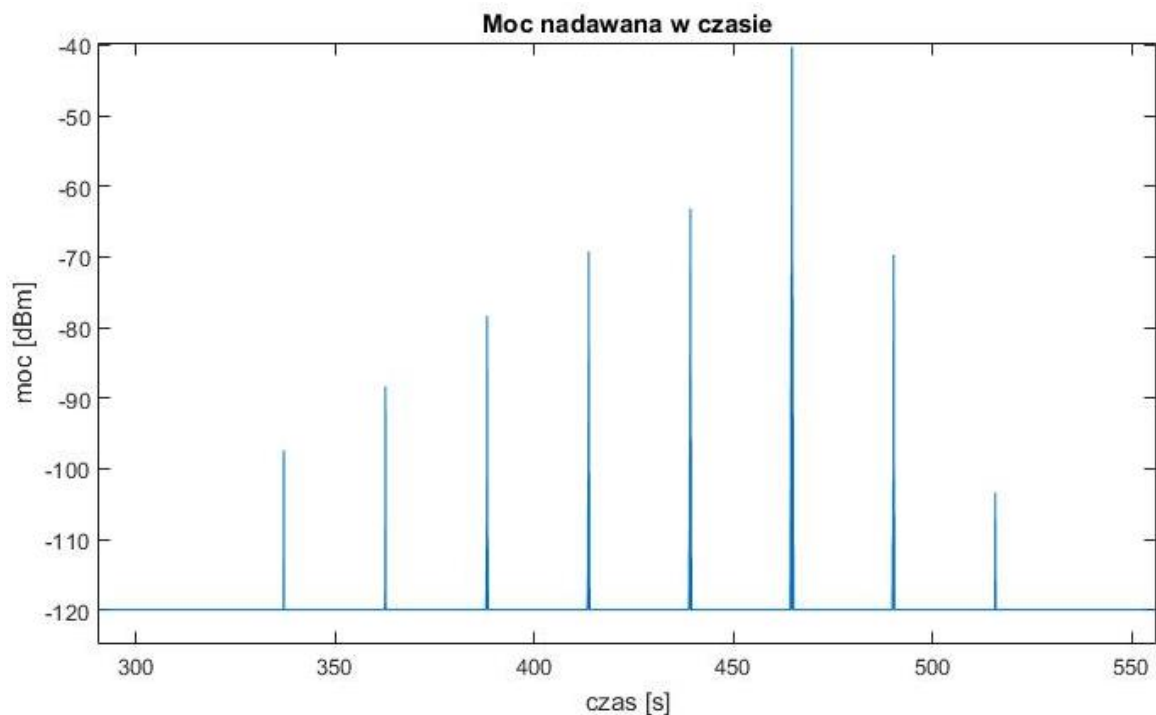
Dla wychylenia, które jest poza charakterystyką anteny zostało przyjęte, że moc szybko spada do poziomu szumu.

Rysunek 6.7 przedstawia ruch anteny w czasie dla obserwacji trwającej około 13 minut. Widać na nim, że antena radaru porusza się zgodnie z założeniami i informacjami otrzymanymi od Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Rysunek 6.8 prezentuje moc w czasie jednego skanowania. Rysunek 6.9 przedstawia przybliżenia wykresu, aby możliwe było zaobserwowanie, że wykres jest podobny do tego z otrzymanej charakterystyki.

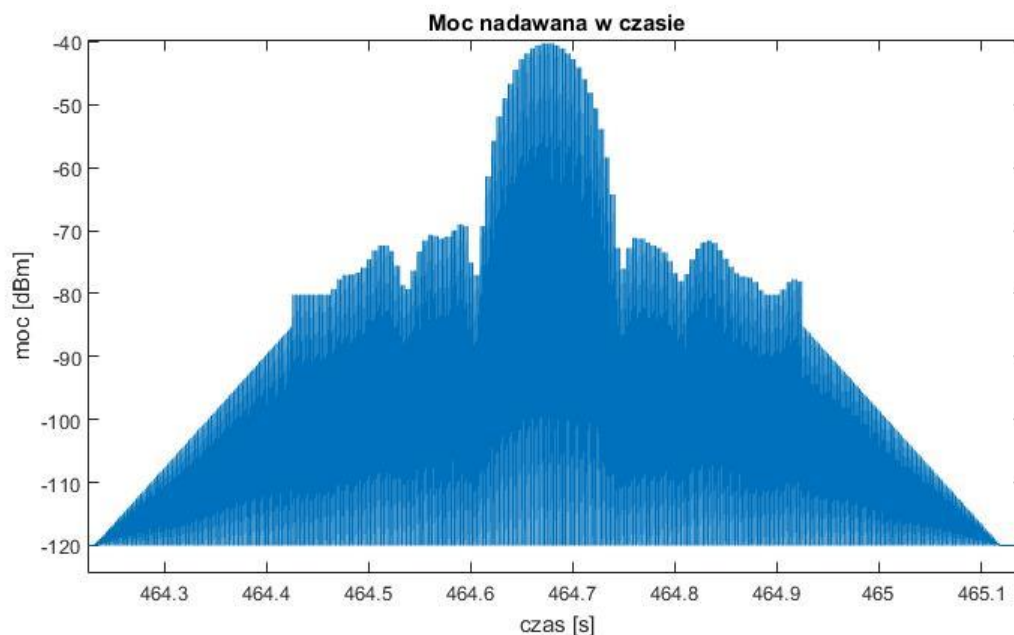
Rysunek 6.10 przedstawia przybliżenie, dla którego widać, że sygnał składa się z pojedynczych impulsów, pomiędzy którymi nie występuje żaden sygnał.



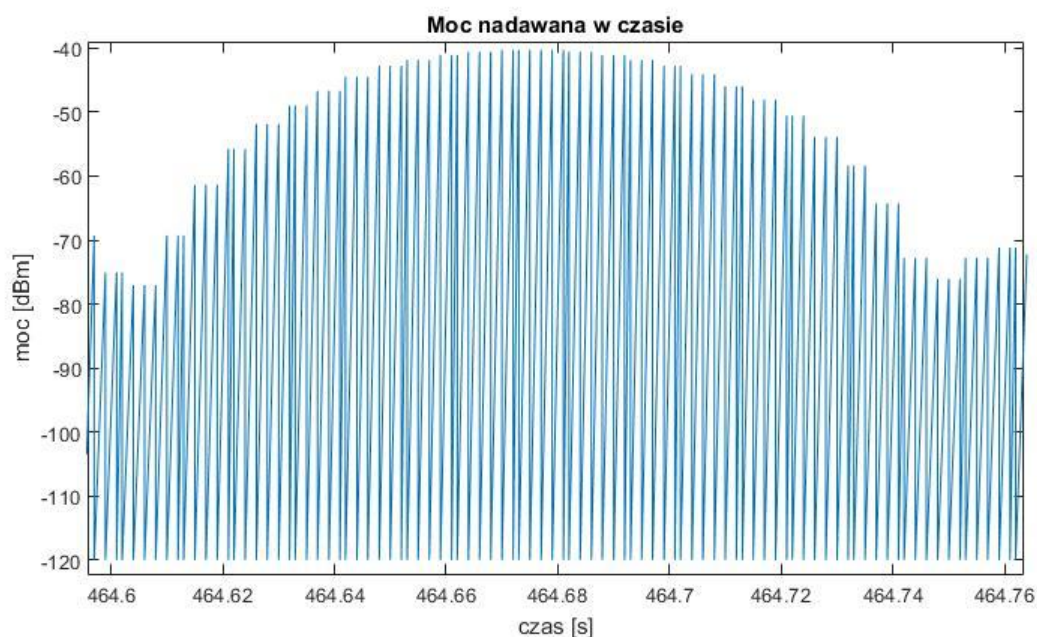
Rys. 6.7. Wykres ruchu anteny w czasie dla pomiaru trwającego około 13 minut



Rys. 6.8. Wykres ruchu anteny w czasie dla czasu jednego skanowania



Rys. 6.9. Wykres przedstawiający zgodność wygenerowanego wykresu z otrzymaną charakterystyką



Rys. 6.10. Wykres przedstawiający pojedyncze impulsy między, którymi nie ma sygnału radarowego.

Rysunek 6.11 przedstawia metodę służącą do obliczenia mocy występującej w odbiorniku w zależności od aktualnego skierowania radaru. Ma dwa parametry wejściowe, z których jeden jest aktualną pozycją odbiornika, a drugi aktualną pozycją skierowania anteny nadawczej. Jeśli różnica kątów jest większa niż $4,5^\circ$ to jest przyjmowany spadek liniowy, jeśli różnica zawiera się w przedziale od $-4,5^\circ$ do $+4,5^\circ$ to jest szukana najbliższa wartość z charakterystyki anteny. Służy do tego tablica *characteristic_x*, która wraz z tablicą *characteristic_y* zawiera odczytane wartości z charakterystyki anteny. Są one pokazane na rysunku 6.12. Metoda *AreSame()* jest metodą pomocniczą i służy do sprawdzenia, czy dwie wartości zmiennoprzecinkowe *double* są takie same.


```

double WeatherRadar::PowerFromAngle(double position_ap, double position_radar)
{
    if (fabs(position_ap - position_radar) > 4.5) {
        return power_radar_db - (10 * fabs(position_ap - position_radar));
    }
    else
    {
        int i = 0;
        while (position_radar - position_ap >= characteristic_x[i])
        {
            i++;
        }
        if (AreSame(position_ap - position_radar, characteristic_x[i]))
            return power_radar_db + characteristic_y[i];
        return power_radar_db + ((characteristic_y[i - 1] + characteristic_y[i]) / 2);
    }
}

```

Rys. 6.11. Kod programu służący do wyliczenia mocy na odbiorniku w zależności od położenia anteny nadawczej

```

const double characteristic_x[91] = { -4.5, -4.4, -4.3, -4.2, -4.1, -4.0, -3.9, -3.8, -3.7, -3.6,
-3.5, -3.4, -3.3, -3.2, -3.1, -3.0, -2.9, -2.8, -2.7, -2.6, -2.5, -2.4, -2.3, -2.2, -2.1, -2.0,
-1.9, -1.8, -1.7, -1.6, -1.5, -1.4, -1.3, -1.2, -1.1, -1.0, -0.9, -0.8, -0.7, -0.6, -0.5, -0.4,
-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6,
1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6,
3.7, 3.8, 3.9, 4.0, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 };
const double characteristic_y[91] = { -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -38.2, -37, -36.8,
-36.8, -36.2, -35.2, -33.6, -32.4, -32, -32.4, -33.8, -37, -40, -38.2, -34.2, -32.2, -30.6, -30.4,
-31, -31.2, -30.4, -29.2, -28.5, -29.8, -40, -33.8, -24.4, -18, -13.2, -10.2, -7.4, -5.6, -3, -2.2,
-1.2, -0.6, -0.2, 0, -0.2, -0.6, -1.2, -2.2, -3, -4.8, -6.8, -9, -11.8, -15.6, -20.8, -27.4, -37.8,
-34, -31.2, -30.8, -31.4, -32, -32.4, -32.8, -33.8, -35.6, -37.6, -38.1, -35.4, -33.4, -32, -31.4,
-31.4, -32.2, -33.6, -35, -36.2, -37, -37.2, -37.4, -38.6, -40, -40, -40, -40, -38.4, -37.6, -37.6,
-38.2 };

```

Rys. 6.12. Charakterystyka anteny nadawczej w formie dwóch tablic

Operacja jest wykonywana zarówno dla ustawienia horyzontalnego jak i dla wertykalnego, a następnie sumowana w skali logarytmicznej. Metoda odpowiedzialna za to znajduje się na rysunku 6.13.

```

void PRF::PowerAndMove()
{
    double power_x = weather_radar->PowerFromAngle(dfs->GetXAP(), weather_radar->GetXRadard());
    double power_y = weather_radar->PowerFromAngle(dfs->GetYAP(), weather_radar->GetYRadard());
    double path_loss = weather_radar->PathLoss(dfs->GetZAP(), true);
    double noise = gen->GenerateChiSquareDistributionFromGamma(); //Szum
    //Ustawienie obliczonej mocy dla danego punktu
    if ((power_x + power_y - path_loss) > -101)
    {
        weather_radar->SetActuallyPowerRadar(power_x + power_y - path_loss + noise);
        dfs->SetActualPowerRadar(power_x + power_y - path_loss + noise);
    }
    else
    {
        //Poziom szumu
        weather_radar->SetActuallyPowerRadar(-101);
        dfs->SetActualPowerRadar(-101);
    }
    //Przesunięcie anteny o 0.0327 stopnia
    weather_radar->SetXRadard(weather_radar->GetXRadard() + 0.0327);
}

```

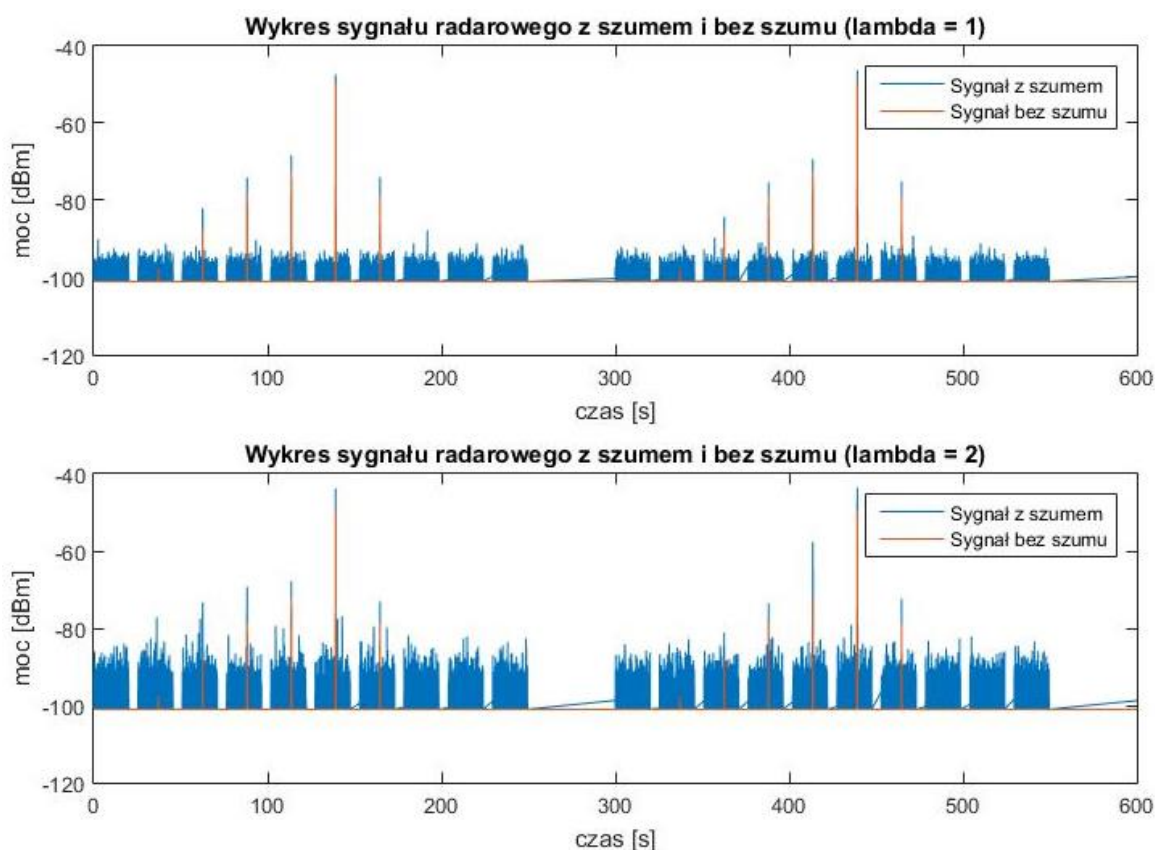
Rys. 6.13. Metoda odpowiedzialna za obliczenie mocy i przesunięcie anteny

Metoda ta jest również odpowiedzialna za ruch anteny, która przesuwa się z krokiem równym $0,0327^\circ$ w osi poziomej, ponieważ w czasie pełnego obrotu jest wysyłane 11000 impulsów, co daje jeden impuls co około $0,0327^\circ$. Dodatkowo wywołuje metodę służącą do obliczenia straty na ścieżce, która została dokładnie opisane w podrozdziale 6.2, jak i wywołuje generator pseudolosowy Chi-kwadrat pierwszego stopnia, który ma za zadanie wygenerować losową wartość szumu i dodać ją do próbki. Szum jest generowany przy pomocy wzoru na rozkładu gamma, ponieważ może on w sposób wystarczająco dobry przybliżyć rozkład Chi-kwadrat pierwszego stopnia. Jest to jedno z uproszczeń zastosowanych w symulacji. Rozkład gamma jest opisany następującą funkcją gęstości prawdopodobieństwa [23]:

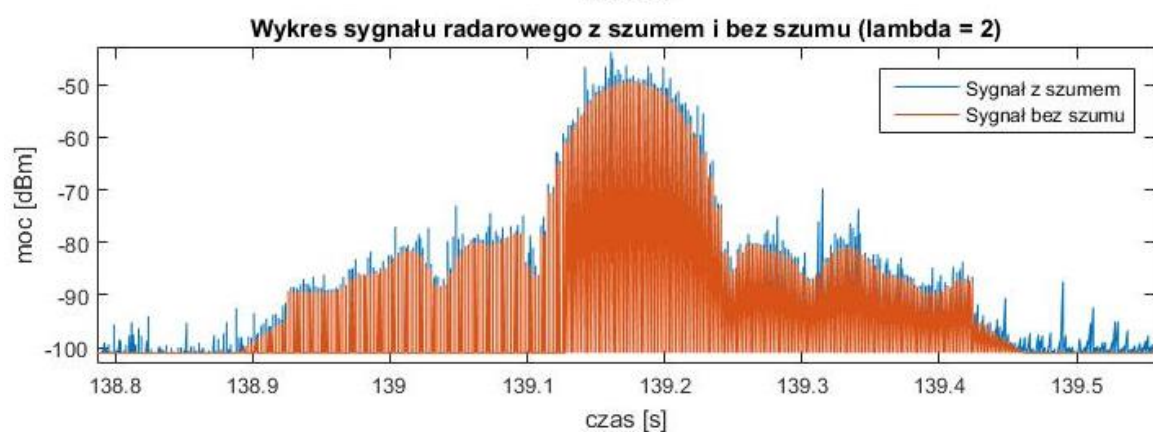
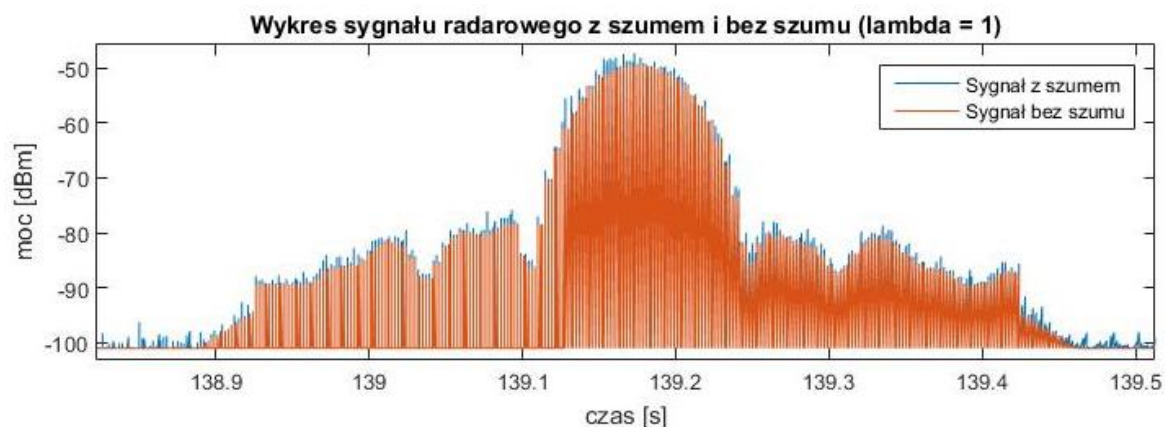
$$\Gamma(x|\alpha, \lambda) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\lambda^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad (6.4)$$

gdzie α – parametr kształtu, λ – parametr skali (lambda), $\Gamma(\alpha)$ – funkcja gamma.

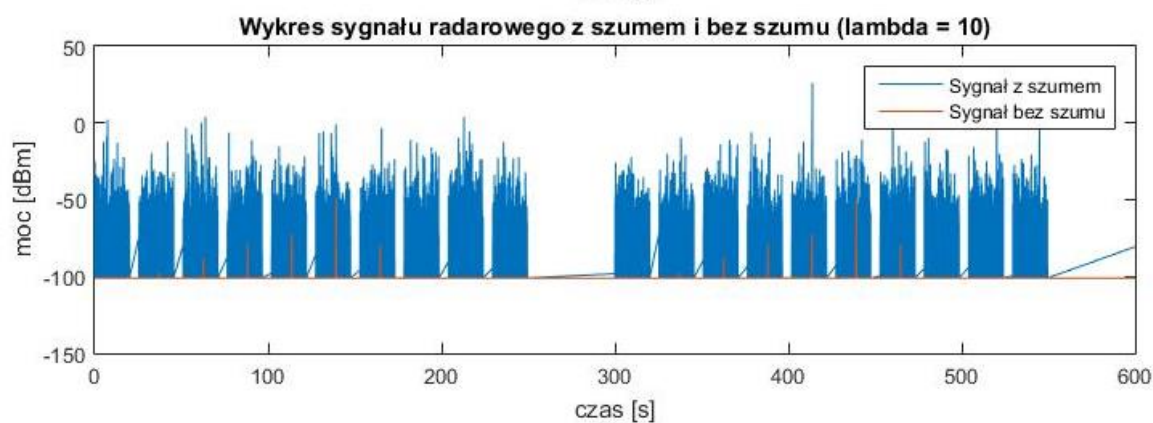
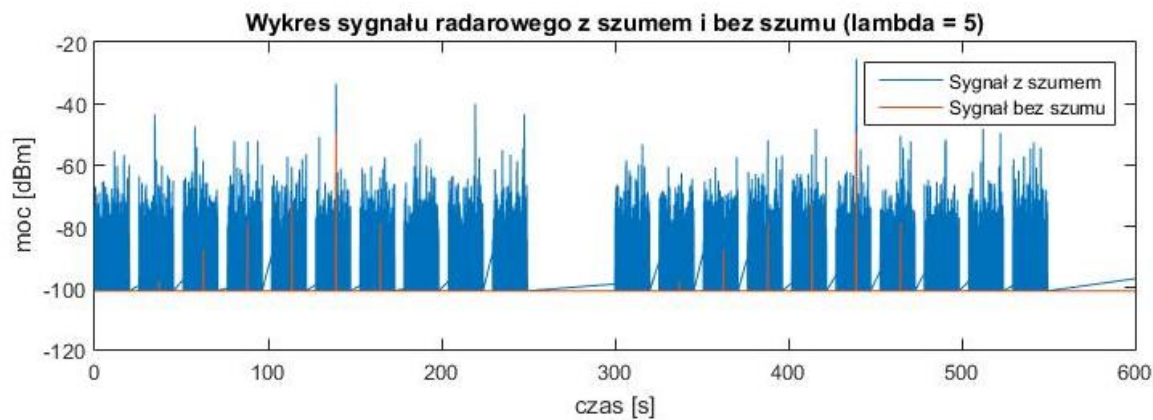
W momencie, kiedy próbka jest mniejsza od poziomu szumu, czyli mniejsza od wartości -101 dB, to jest sprowadzana do poziomu szumu, zaś gdy jest większa od poziomu szumu to zostaje zaktualizowana wartość mocy odbieranej w odbiorniku. Rysunki 6.14, 6.15, 6.16 i 6.17 prezentują, jak wartość parametru skali wpływa na sygnał radarowy. Widać na nich, że dla większej wartości parametru skali poziom szumu znacznie wzrasta, przez co może pojawiać się o wiele więcej fałszywych informacji o wykryciu sygnału radarowego.



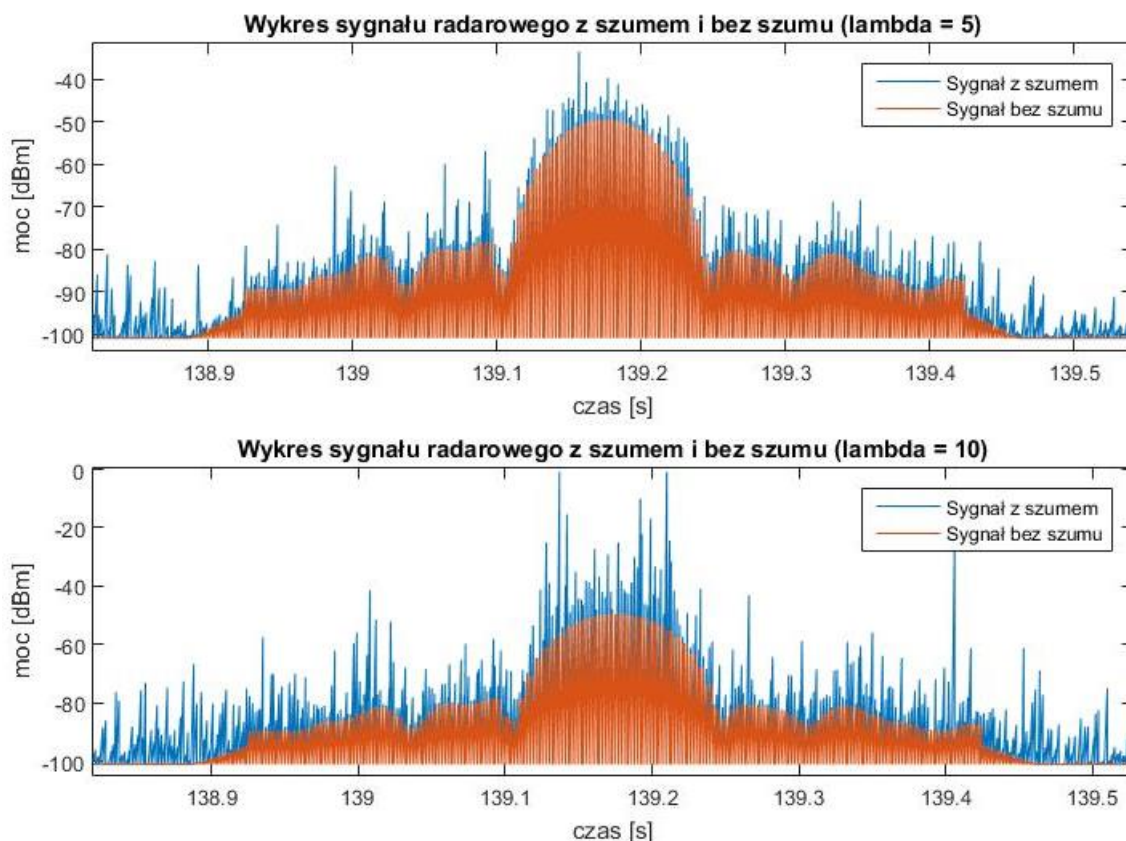
Rys. 6.14. Sygnał z szumem dla lambda równej 1 i 2, czas symulacji 10 minut



Rys. 6.15. Sygnał z szumem dla lambdy równej 1 i 2, zbliżenie na impuls o najwyższej mocy



Rys. 6.16. Sygnał z szumem dla lambdy równej 5 i 10, czas symulacji 10 minut



Rys. 6.17. Sygnał z szumem dla lambda równej 5 i 10, zbliżenie na impuls o najwyższej mocy

6.4. Scenariusze i wyniki symulacji

Pierwszy scenariusz pomiarowy zakładał stałe ustawienie odbiornika w osi poziomej na 30° i na 7° w osi pionowej. Zostały wykonane symulacje dla różnych okresów próbkowania kanału, aby zapewnić prawdopodobieństwo obserwacji sygnału radarowego na poziomie 99,99% dla procedury CAC i na poziomie co najmniej 60% dla procedury In-Service Monitoring. W tym przypadku najważniejszym parametrem jest prawdopodobieństwo poprawnej detekcji sygnału, które jest wyrażone wzorem:

$$P_{PD} = \frac{L_{PD}}{L_{WPD}}, \quad (6.5)$$

gdzie P_{PD} – prawdopodobieństwo poprawnej detekcji, L_{PD} – liczba dokonanych detekcji sygnału radarowego w momentach, kiedy sygnał radarowy faktycznie występował, L_{WPD} – liczba wszystkich detekcji sygnału radarowego, jakie powinny być wykonane. Wzór ten wyraża iloraz poprawnych detekcji odbiornika do wszystkich impulsów docierających z mocą powyżej -62 dBm nadanych przez radar. Odstęp próbkowania oznacza, jak często jest sprawdzane, czy pojawił się sygnał radarowy w symulacji. Tabela 6.1 przedstawia wyniki dla tego scenariusza.

Tab. 6.1. Prawdopodobieństwo detekcji w zależności od odstępu próbkowania i odległości

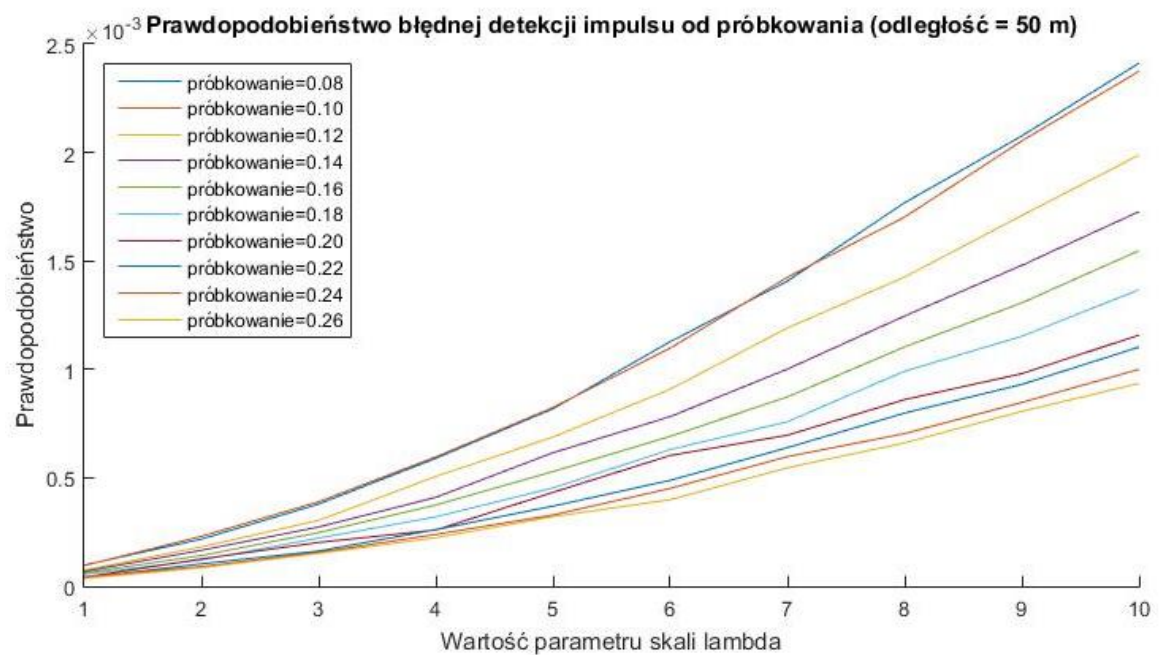
| Odstęp próbkowania [ms] | Odległość [m] | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| 0.08 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.12 | 0,8289 | 0,8298 | 0,8360 | 0,8272 | 0,8227 | 0,8336 | 0,8392 | 0,8161 | 0,8165 |
| 0.14 | 0,7135 | 0,7111 | 0,7091 | 0,7121 | 0,7168 | 0,7163 | 0,7199 | 0,7259 | 0,7224 |
| 0.16 | 0,6230 | 0,6174 | 0,6163 | 0,6250 | 0,6289 | 0,6182 | 0,6228 | 0,6279 | 0,5995 |
| 0.18 | 0,5455 | 0,5633 | 0,5668 | 0,5597 | 0,5484 | 0,5526 | 0,5523 | 0,5462 | 0,5446 |
| 0.20 | 0,5064 | 0,5265 | 0,5107 | 0,5062 | 0,5246 | 0,4705 | 0,4694 | 0,5088 | 0,4668 |
| 0.22 | 0,4545 | 0,4542 | 0,4565 | 0,4536 | 0,4540 | 0,4551 | 0,4533 | 0,4517 | 0,4545 |
| 0.24 | 0,4202 | 0,4193 | 0,4271 | 0,4171 | 0,4143 | 0,4320 | 0,4205 | 0,4130 | 0,4267 |
| 0.26 | 0,3960 | 0,3905 | 0,3815 | 0,3849 | 0,3805 | 0,3796 | 0,3952 | 0,3777 | 0,3767 |

Z danych wynika, że, aby zapewnić 100% prawdopodobieństwo poprawnej detekcji, odstęp próbkowania powinien być nie większy niż 0,10 ms. Z kolei, aby prawdopodobieństwo wyniosło co najmniej 60%, odstęp próbkowania musi wynieść maksimum 0,16 ms. Ten scenariusz pozwolił określić odstępy próbkowania, których trzeba użyć w symulacji, aby była ona zgodna z wytycznymi określonymi w standardzie ETSI EN 301 893 v2.1.1.

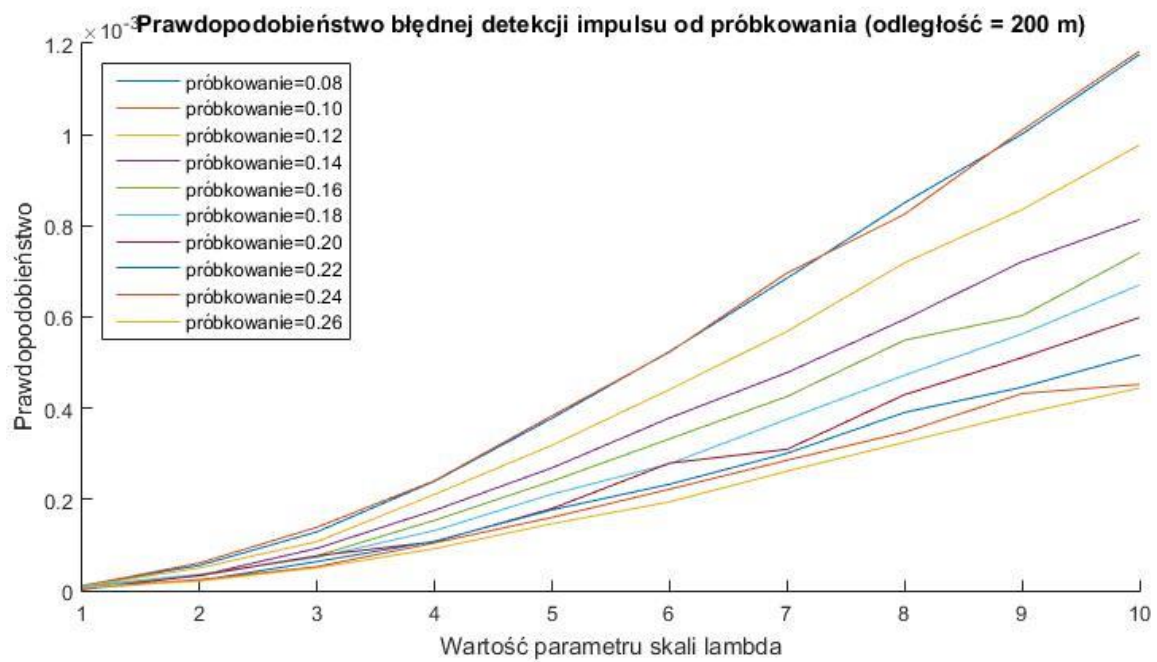
Drugi scenariusz polegał na przyjęciu 4 różnych odległości radaru od urządzenia (50 m, 200 m, 350 m i 500 m) i dokonanie pomiaru prawdopodobieństwa błędnej detekcji impulsu (fałszywego alarmu), którą można wyrazić wzorem:

$$P_{BD} = \frac{L_{FD}}{L_{PN}}, \quad (6.6)$$

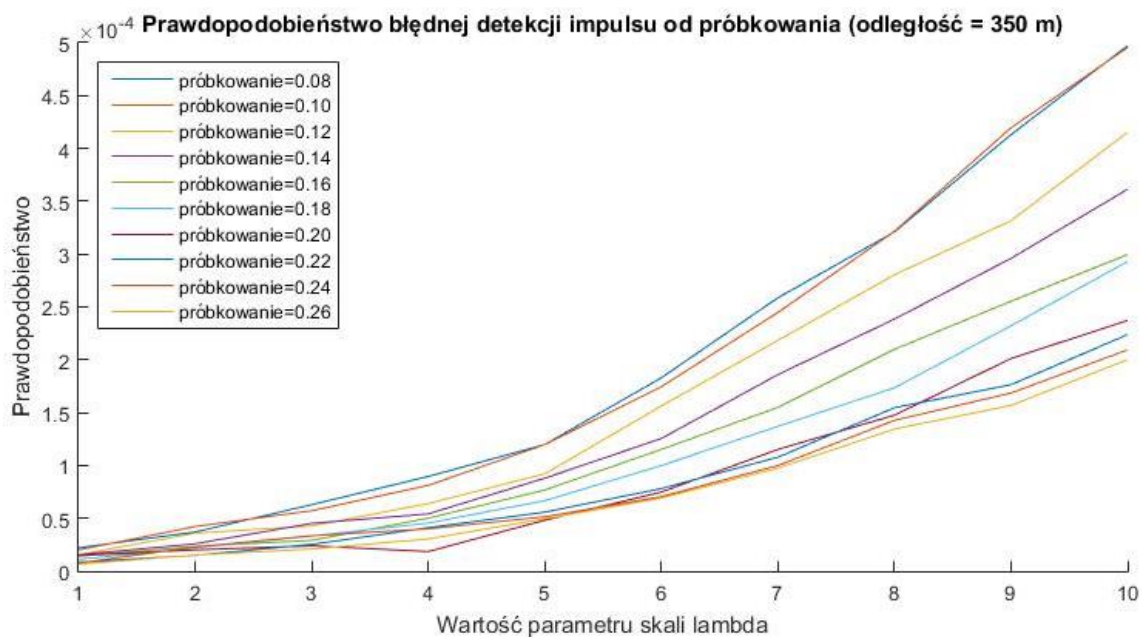
gdzie P_{BD} – prawdopodobieństwo błędnej detekcji, L_{FD} – liczba fałszywych detekcji, oznacza ona, że został wykryty sygnał radarowy w momencie, kiedy go nie było (nie powinien być wykryty), L_{PN} – liczba wszystkich detekcji braku sygnału radarowego (moc na odbiorniku poniżej -62 dBm) jaka powinna być dokonana. Wzór ten wyraża iloraz liczby błędnych detekcji wykrycia sygnału radarowego w odbiorniku do wszystkich detekcji z mocą poniżej -62 dBm, które powinny być wykonane. W przypadku braku szumu, wzór (6.5) zawsze by zwracał prawdopodobieństwo równe 0, co by oznaczało, brak fałszywych alarmów. Rysunki od 6.18 do 6.21 zawierają wyniki symulacji dla tego scenariusza.



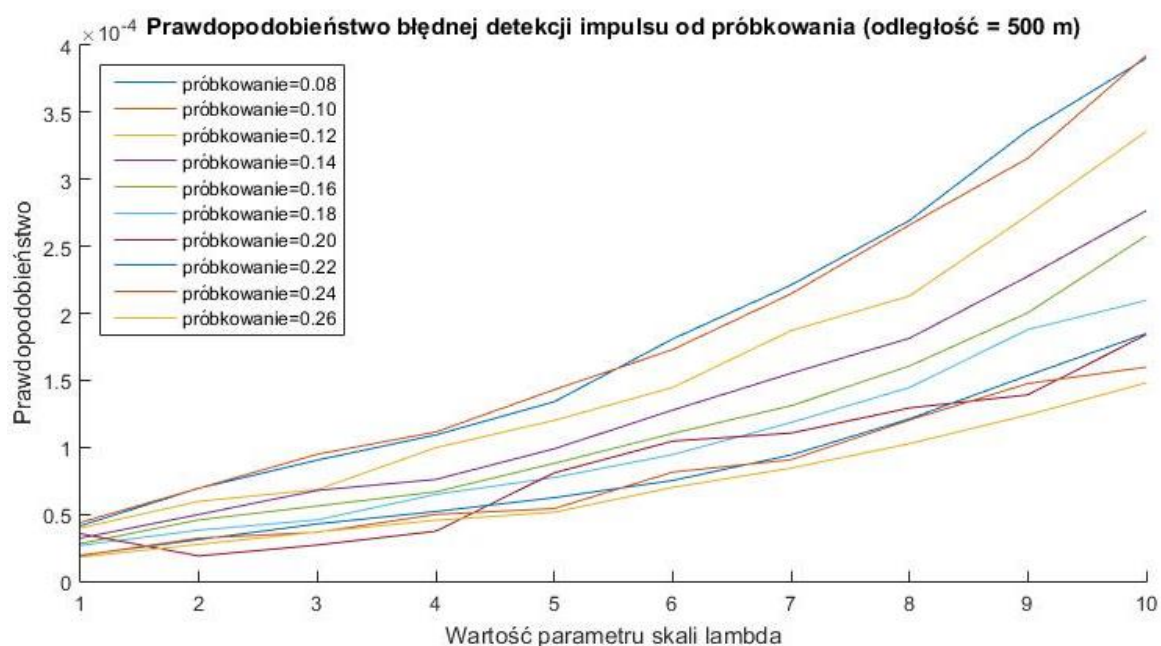
Rys. 6.18. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji impulsu w zależności od lambda dla odległości równej 50 m i różnych odstępów próbkowania



Rys. 6.19. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji impulsu w zależności od lambda dla odległości równej 200 m i różnych odstępów próbkowania



Rys. 6.20. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji impulsu w zależności od lambda dla odległości równej 350 m i różnych odstępów próbkowania



Rys. 6.21. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji impulsu w zależności od lambda dla odległości równej 500 m i różnych odstępów próbkowania

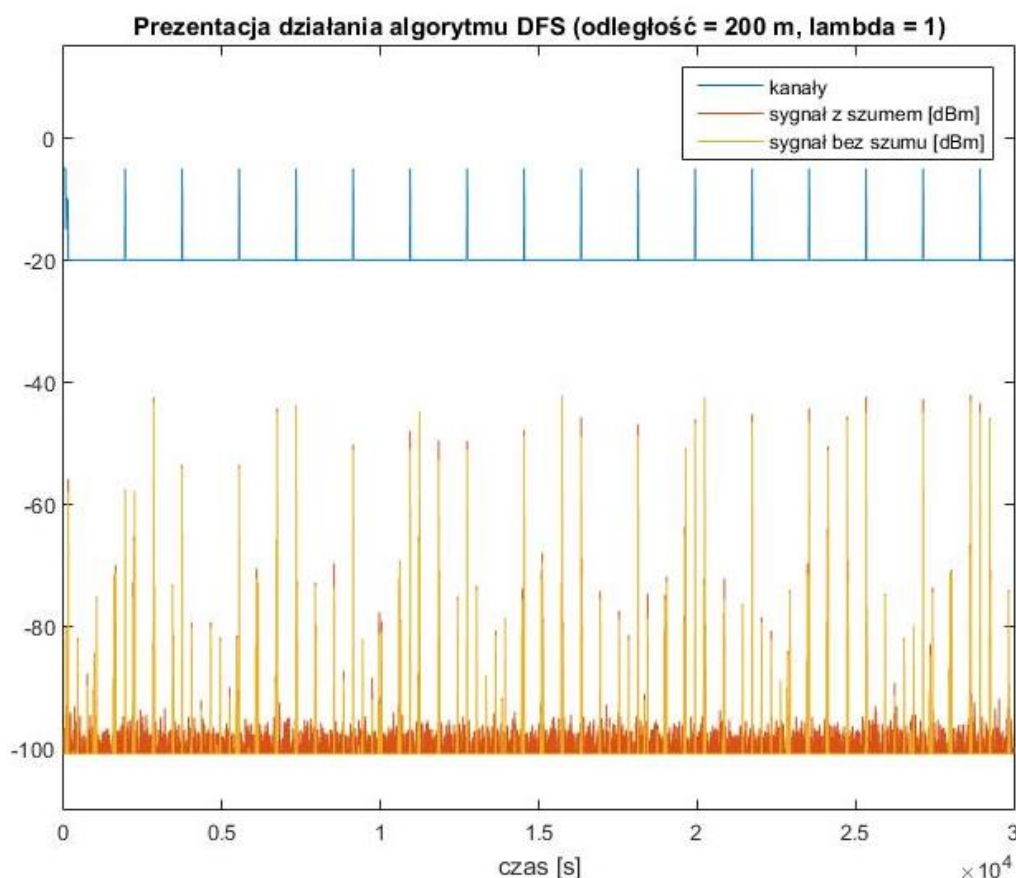
Wraz ze wzrostem wartości parametru skali rośnie również prawdopodobieństwo fałszywego alarmu, ponieważ moc szumu znacząco wpływa na sygnał poprzez zniekształcanie go (zwiększanie jego mocy). Jest ten efekt, również dobrze widoczny na rysunku 6.15 i 6.17. Odstęp próbkowania definiuje jak często będzie sprawdzane czy pojawił się sygnał radarowy, więc im jest on wyższy tym rzadziej dokonywane jest sprawdzania, a co za tym idzie następuję mniej błędnych detekcji sygnału.

Ostatnim scenariuszem symulacyjnym była obserwacja działania całego algorytmu DFS, który w momencie wykrycia sygnału radarowego (moc powyżej -62 dBm) powinien

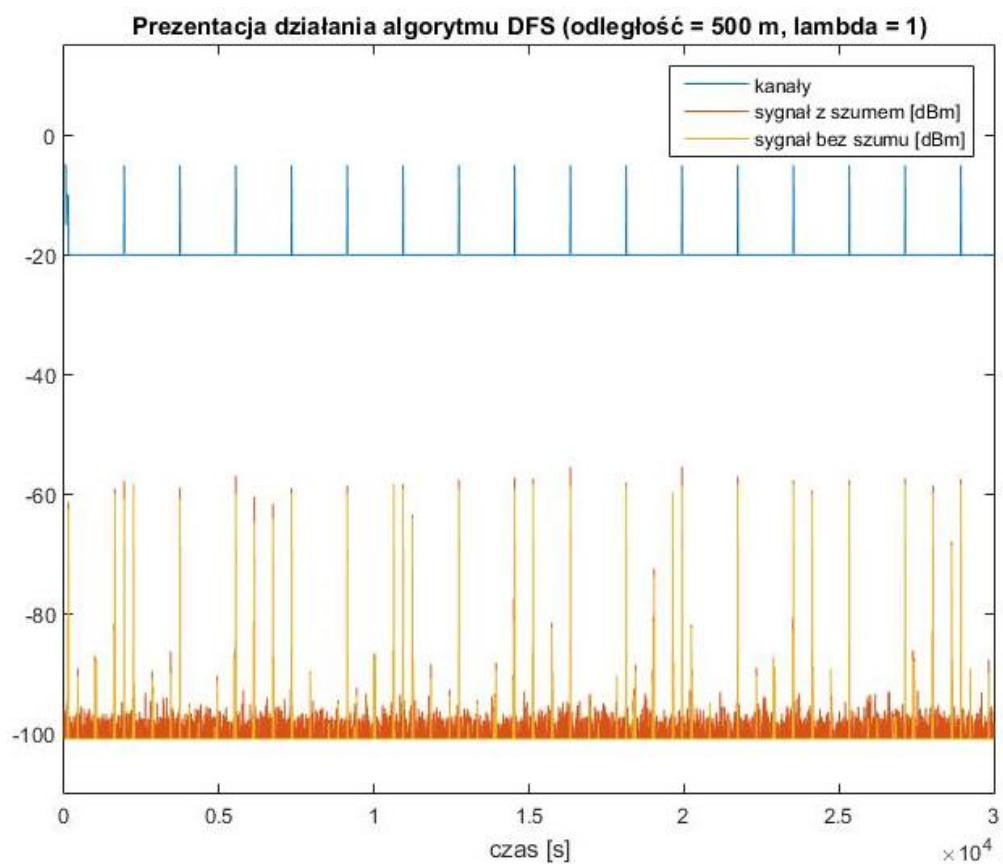
wyłączyć nadawania sygnału WLAN na kanale i przejść przez kolejne kroki zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 6.2. Scenariusz został wykonany dla różnych wartości odległości (od 50 m do 1475 m) i dla 4 wartości parametru skali (1, 2, 5 i 10). Na poniższych rysunkach widoczna jest prezentacja działania algorytmu DFS dla różnych przypadków odległości i dla dwóch wartości parametru skali. Żółte impulsy reprezentują moc sygnału na odbiorniku, gdyby nie występował szum, a czerwone moc sygnału na odbiorniku, gdy do mocy sygnału dodano, w skali logarytmicznej, chwilową wartość mocy szumu. Niebieska linia reprezentują kanały radiowe, które mogą przyjąć jedną z 4 wartości:

- wartość -20 odpowiada kanałowi niedostępnemu
- wartość -15 odpowiada kanałowi dostępnemu
- wartość -10 odpowiada kanałowi operacyjnemu
- wartość -5 odpowiada kanałowi użytkowemu

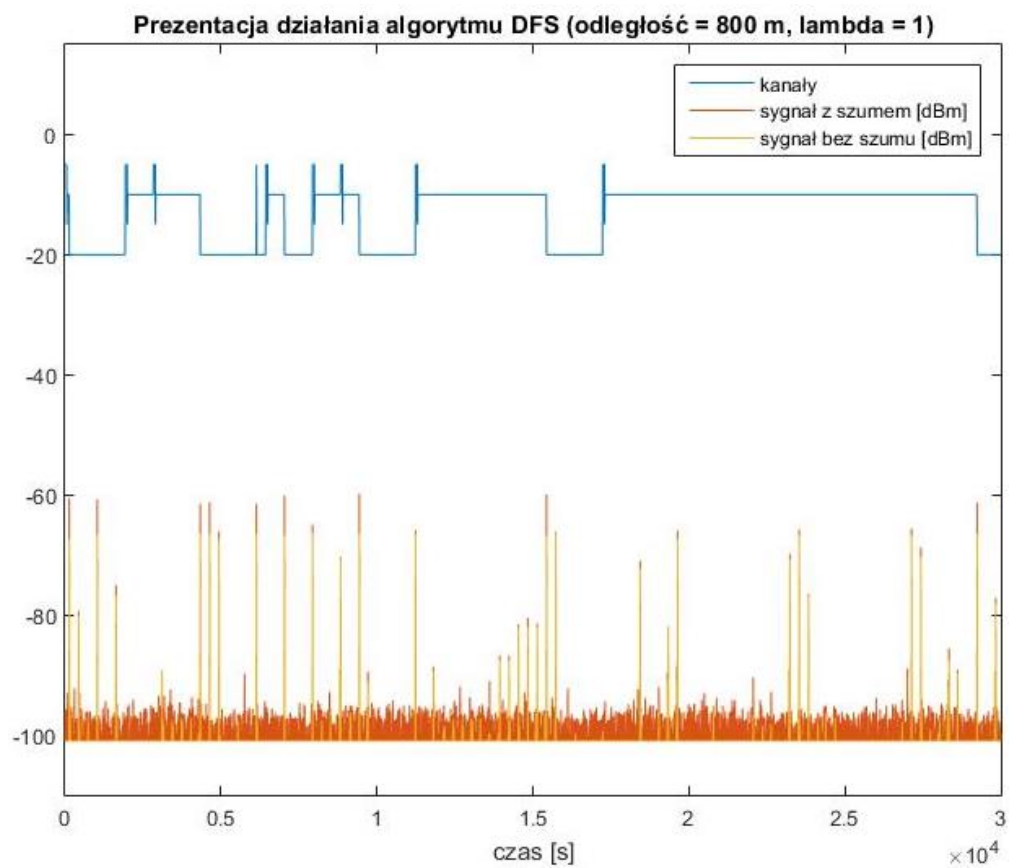
Wykresy ruchu anteny nie są dokładnie widoczne, jest to spowodowane tym, że była zapisywana co około 500 próbek. Wynika to z tego, że przy symulacji, w której czas symulacyjny trwa 24 godziny zapisywanie każdej próbki wygenerowało by zbyt duży plik, którego nie można by łatwo wyświetlić w postaci wykresu. Rysunki od 6.22 do 6.25 przedstawiają wykresy dla parametru skali równemu 1 i 4 różnych odległości. Zostało przedstawione około 8 godzin symulacji w celu lepszej czytelności wykresów.



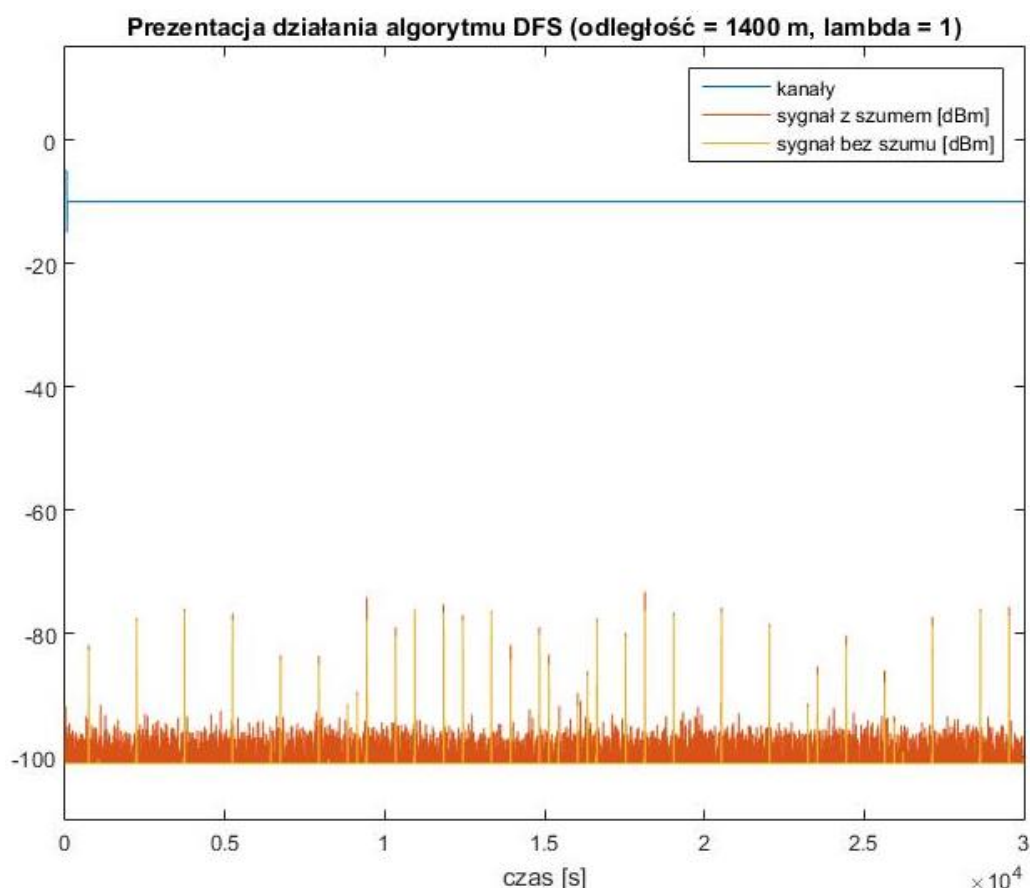
Rys. 6.22. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 200 m i lambdy równej 1



Rys. 6.23. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 500 m i lambdy równej 1



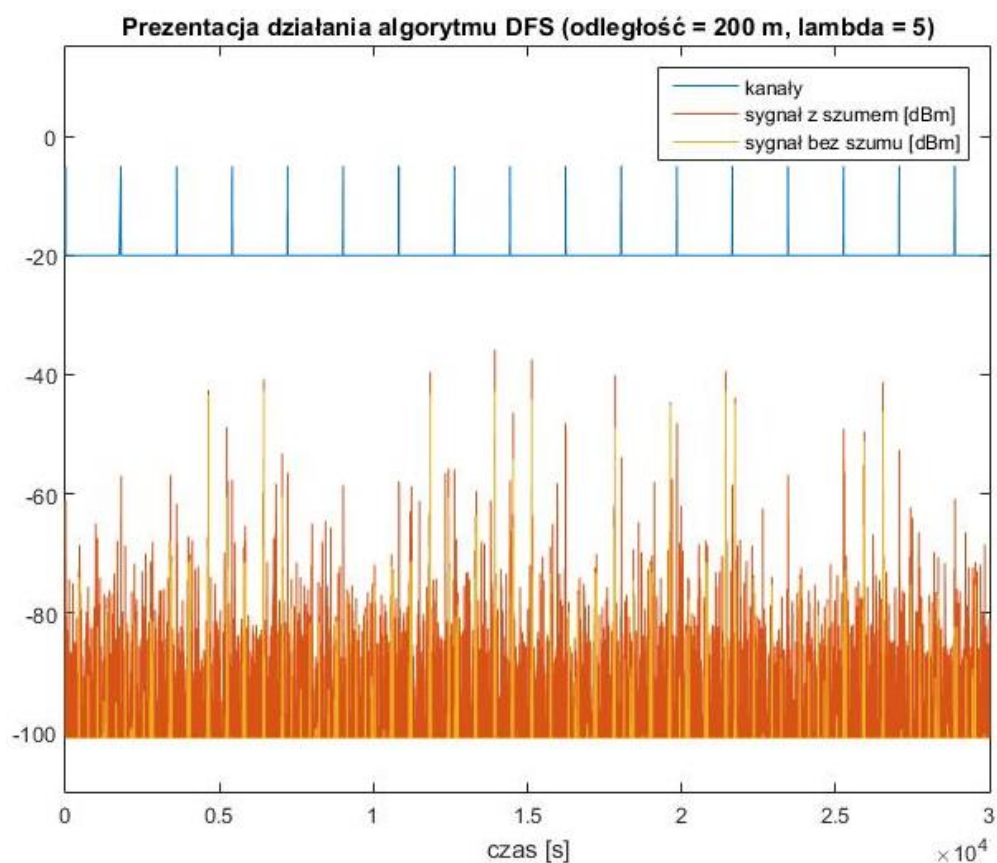
Rys. 6.24. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 800 m i lambdy równej 1



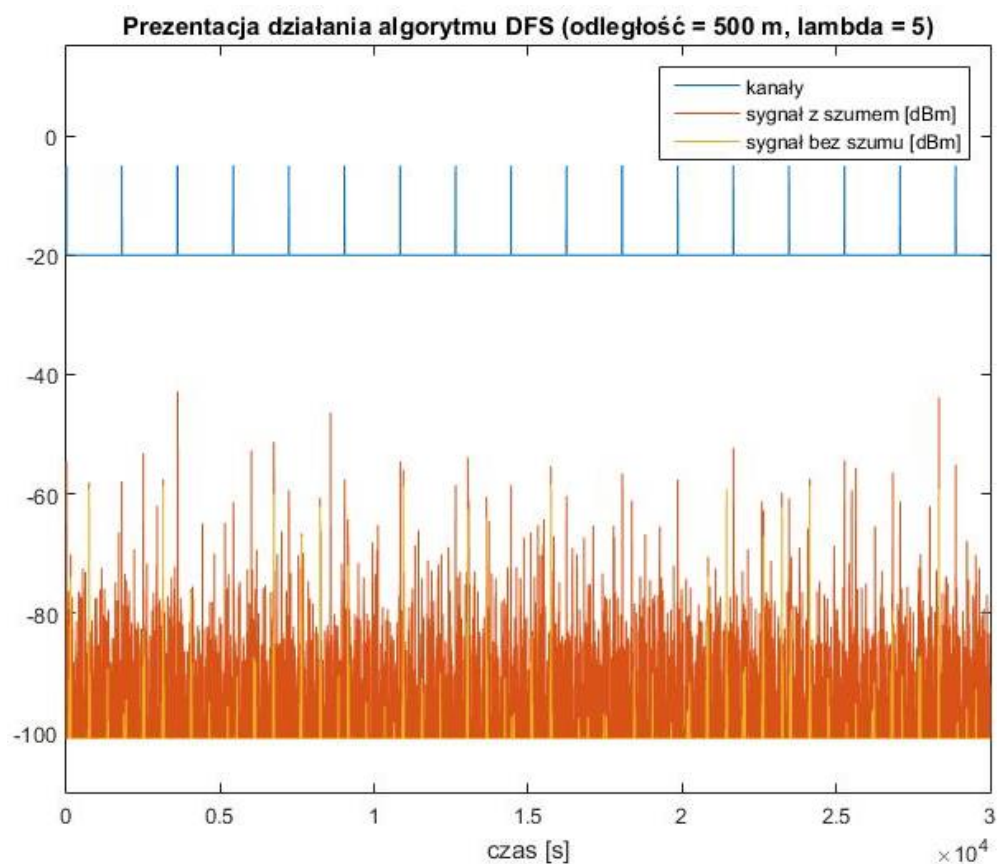
Rys. 6.25. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 1400 m i lambdy równej 1

Z wykresów widać, że algorytm działa poprawnie, czyli w momencie pojawienia się impulsu powyżej -62 dBm następuje zerwanie transmisji (zmiana stanu kanału na -20), następuje czas okupacji, a następnie po nim znów jest wykonywana procedura CAC (zmiana stanu kanału na -5). Po pozytywnym zakończeniu procedury CAC kanał staje się kanałem dostępnym (zmiana stanu kanału na -15), a następnie możliwe jest rozpoczęcie transmisji na tym kanale (zmiana stanu kanału na -10). Od odległości 800 m detekcja jest wykonywana w przypadku sygnału z zakłóceniami, jest to fałszywy alarm, którego należy się pozbyć, ponieważ generuje on błędne uruchamianie czasu okupacji, co utrudnia lub nawet uniemożliwia działanie urządzeń Wi-Fi™. Zostały wybrane 4 wykresy, które obrazują zachowania się algorytmu, od etapu, gdzie nie dochodzi do rozpoczęcia transmisji z powodu dużej mocy sygnału radarowego, do etapu, gdzie cały czas trwa transmisja.

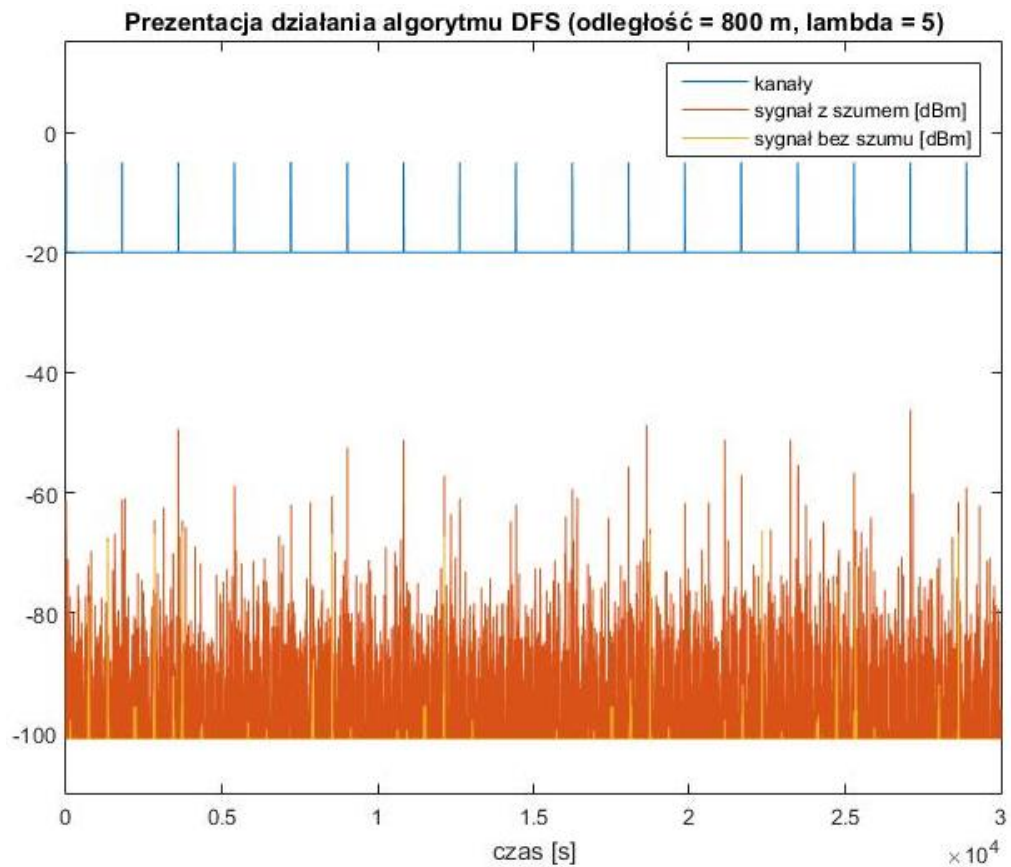
Rysunki od 6.26 do 6.29 przedstawiają ten sam scenariusz co poprzednie, tylko dla parametru skali równemu 5.



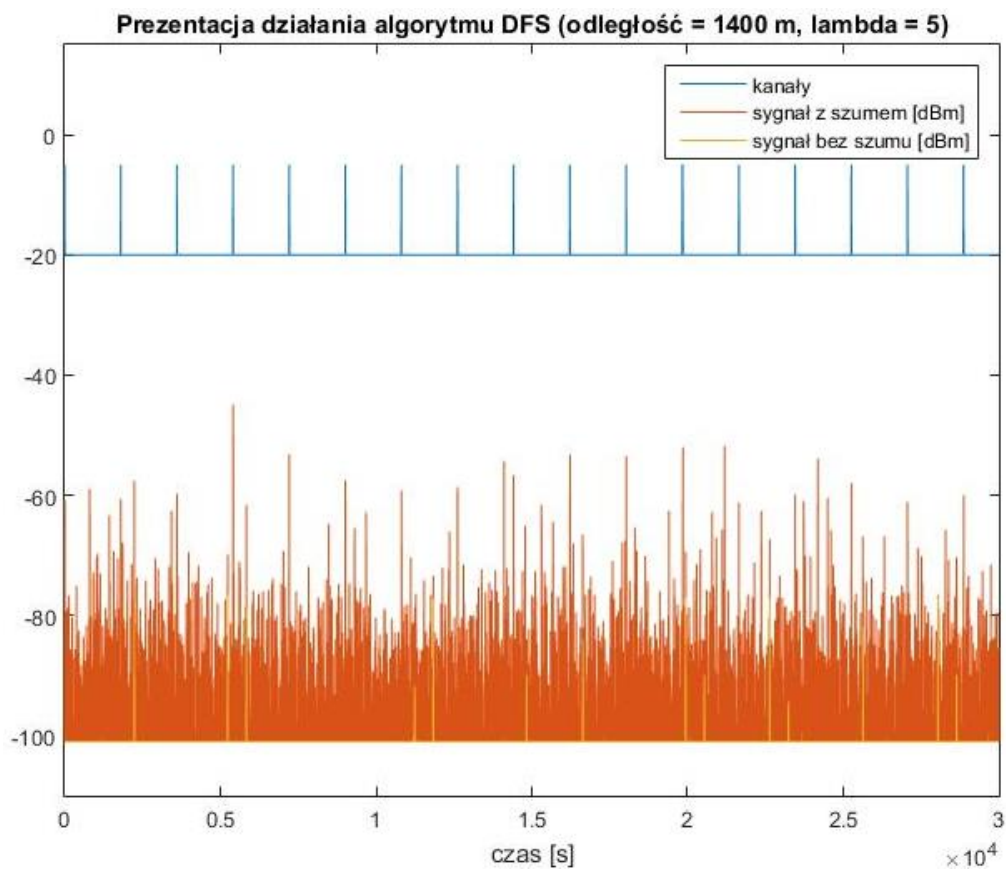
Rys. 6.26. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 200 m i λ równej 5



Rys. 6.27. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 500 m i λ równej 5



Rys. 6.28. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 800 m i lambdy równej 5



Rys. 6.29. Prezentacja działania algorytmu DFS dla odległości 1400 m i lambdy równej 5

Dla większych wartości parametru skali zakłócenia są tak mocne, że bardzo rzadko dochodzi do rozpoczęcia transmisji nawet wtedy, gdy sygnał radarowy jest już bardzo mały.

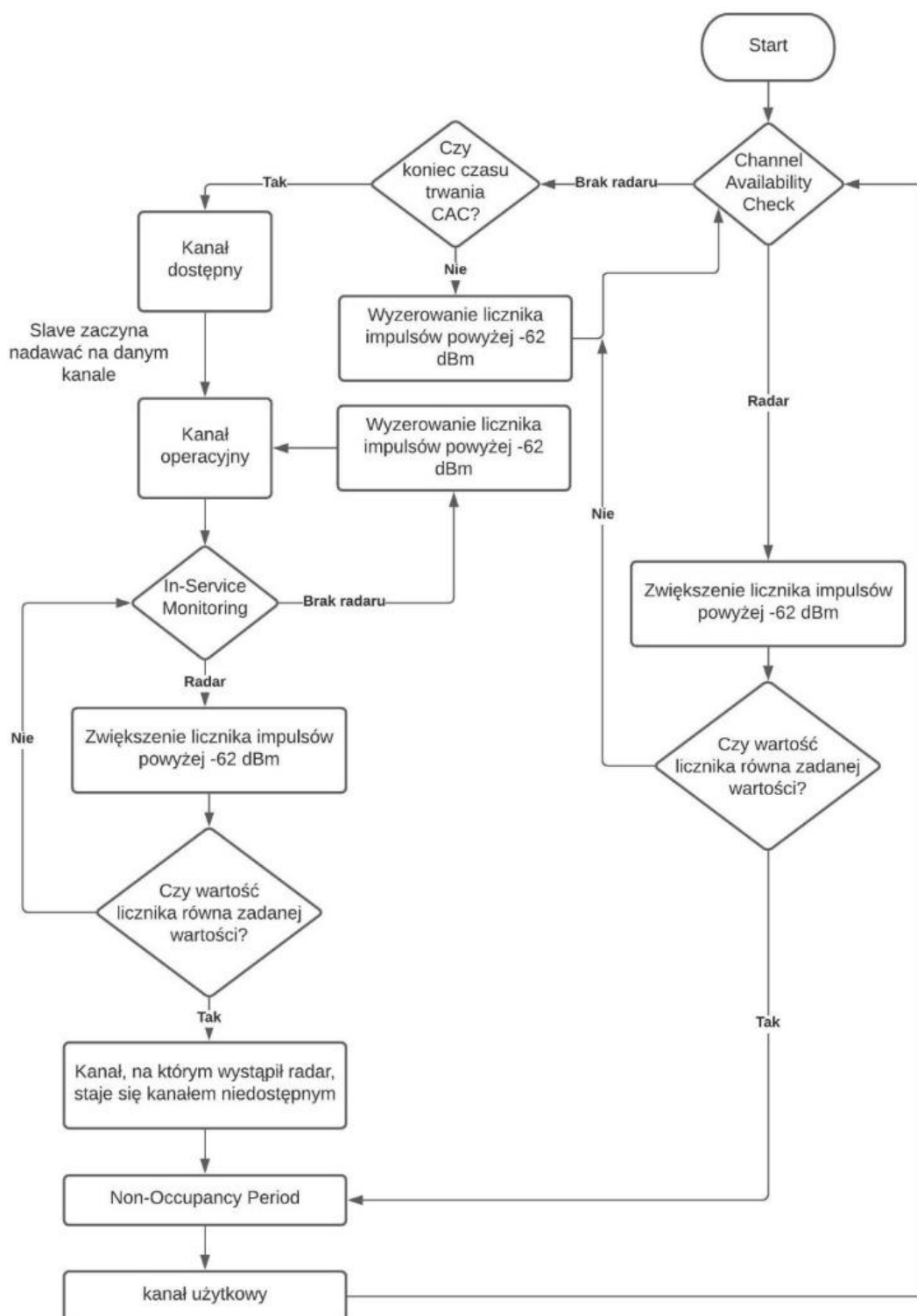
Te scenariusze były niezbędne, aby przetestować działanie algorytmu i na ich podstawie można wysnuć wnioski w jakich kierunkach można rozwinąć działanie algorytmu DFS. Jednym z ulepszeń jest pozbycie się problemu natychmiastowej detekcji sygnału po przekroczeniu progu -62 dBm. Można tego dokonać poprzez wprowadzenie dłuższego czasu obserwacji sygnału, ponieważ szum charakteryzuje się tylko chwilowym skokiem wartości, a sygnał radarowy jest sygnałem rosnącym, który utrzymuje się dłużej ponad poziomem detekcji. Drugim z proponowanych ulepszeń jest wprowadzenie czasu obserwacji działania radaru, a następnie nadawanie sygnału w przerwach pomiędzy występowaniem sygnału radarowego, co pozwala na bardziej optymalne korzystanie z widma. Te zagadnienia zostaną dokładniej opisane wraz z realizacją w rozdziale 7.

7.2. Eksperymenty wprowadzające ulepszenia – symulacja

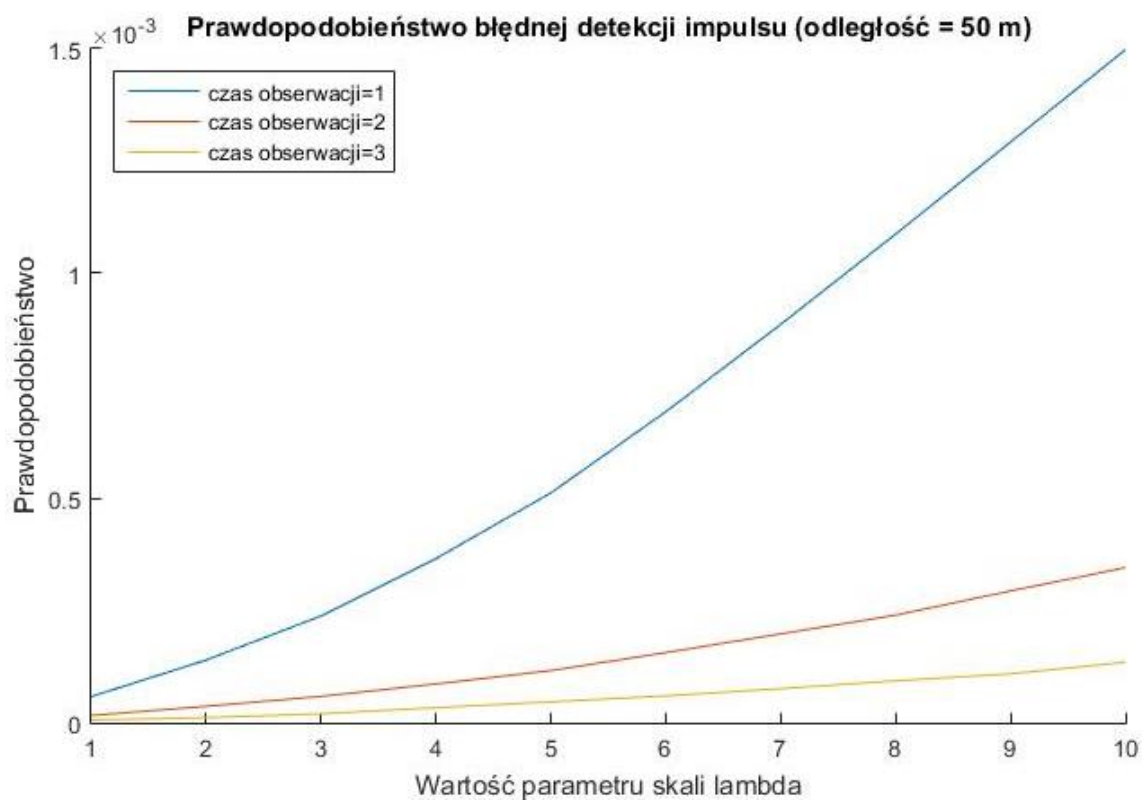
Jednym z problemów napotkanych w podstawowym algorytmie działania DFS jest to, że wykrycie radaru następuje po jednorazowym wystąpieniu mocy szumu powyżej -62 dBm. Oznacza to, że w przypadku wystąpienia mocnego szumu również zostanie wywołany mechanizm DFS, a co za tym idzie nastąpi wyłączenie transmisji na okres minimum 30 minut. Może powodować to wiele fałszywych alarmów, które będą znacząco utrudniały, a nawet uniemożliwiały pracę w sieci Wi-Fi™. Jednym z pomysłów, aby ulepszyć działanie algorytmu DFS jest wprowadzenie dłuższego czasu obserwacji sygnału po pierwszej detekcji mocy. Moc odbierana w urządzeniu charakteryzuje się tym, że narasta, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej, następuje to w momencie, kiedy antena radaru jest nakierowana w stronę miejsca ustawienia odbiornika. Korzystając z tego faktu można stwierdzić, że poprawnie wykryty sygnał radarowy będzie się charakteryzował tym, że moc sygnału w kolejnych momentach obserwacji będzie cały czas powyżej wartości progowej -62 dBm. Stosując odpowiednio długi czas obserwacji można zniwelować ryzyko pojawienia się fałszywych alarmów do pomijalnie małych wartości. Wartość czasu obserwacji w symulacji oznacza liczbę impulsów z mocą powyżej -62 dBm, po których algorytm DFS ma uznać, że jest to sygnał radarowy, a nie fałszywy alarm spowodowany dużymi chwilowymi wartościami szumu. Rysunek 7.9 przedstawia zmodyfikowany algorytm DFS z rysunku 6.2, który zawiera dodany mechanizm dłuższego czasu obserwacji.

W momencie, kiedy zostanie wykryty radar, czyli moc w odbiorniku będzie większa niż -62 dBm, następuje zwiększenie wartości licznika, który ma za zadanie zliczanie impulsów z mocą powyżej -62 dBm. Następnie jest sprawdzany warunek, czy wartość licznika jest równa wartości zadanej, czyli ustalonej wartości czasu obserwacji. Jeśli jest równy to oznacza, że jest to faktycznie sygnał radarowy i należy przerwać transmisję (lub zabronić transmisji w przypadku CAC) w tym kanale na czas określony przez Non-Occupancy Period. Jeśli licznik nie jest równy zadanej wartości, to następuje dalsza obserwacja mocy odbieranej. W przypadku, gdy kolejny impuls będzie miał moc poniżej -62 dBm oznacza to, że był to tylko fałszywy alarm spowodowany szumem i nie trzeba zablokować kanału. Wtedy również należy wyzerować wartość licznika.

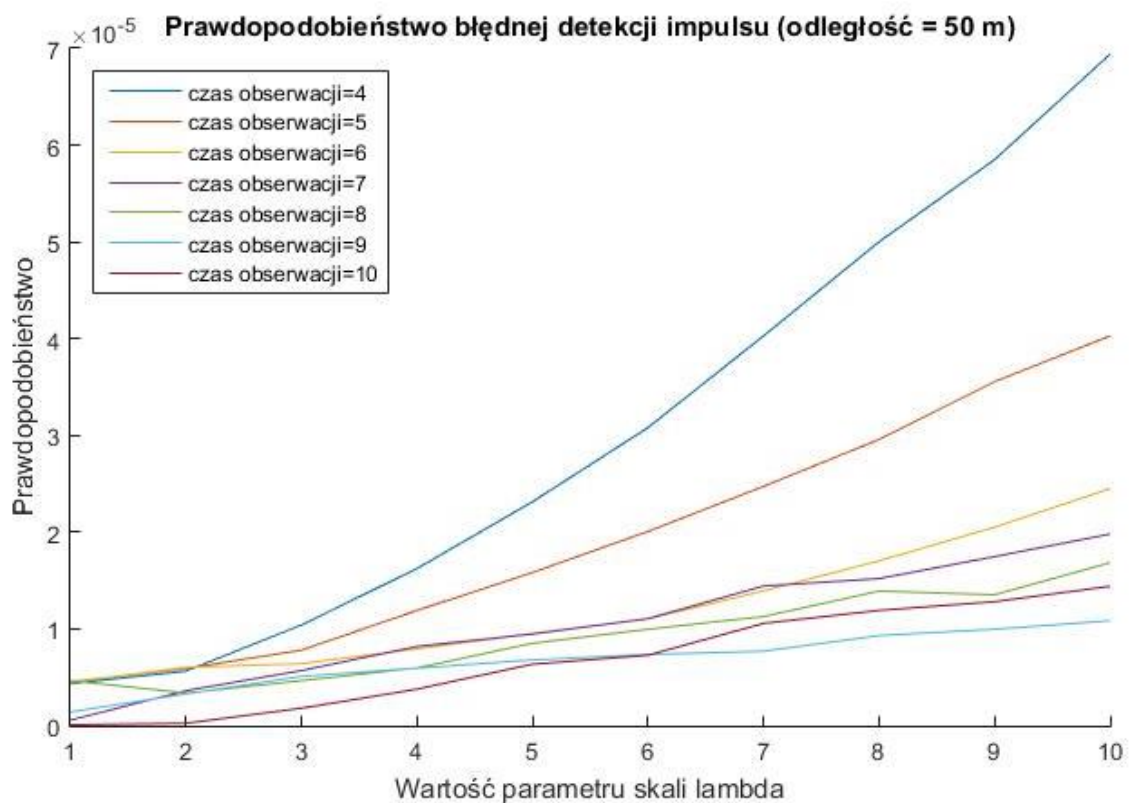
Testy symulacyjne zostały przeprowadzone dla różnych wartości czasu obserwacji i dla dwóch wartości odległości (50 m i 450 m). Obserwowane jest prawdopodobieństwo błędnej detekcji (fałszywego alarmu). Rysunki od 7.10 do 7.13 zawierają wykresy dla różnych wartości czasu obserwacji i różnych wartości parametru skali oraz dla stałej odległości równej 50 m. Czas obserwacji oznacza liczbę kolejnych impulsów z mocą powyżej -62 dBm po jakich należy uznać, że występujący sygnał jest faktycznie sygnałem radarowym, a nie tylko zakłóceniami wynikającymi z dużej chwilowej wartości szumu.



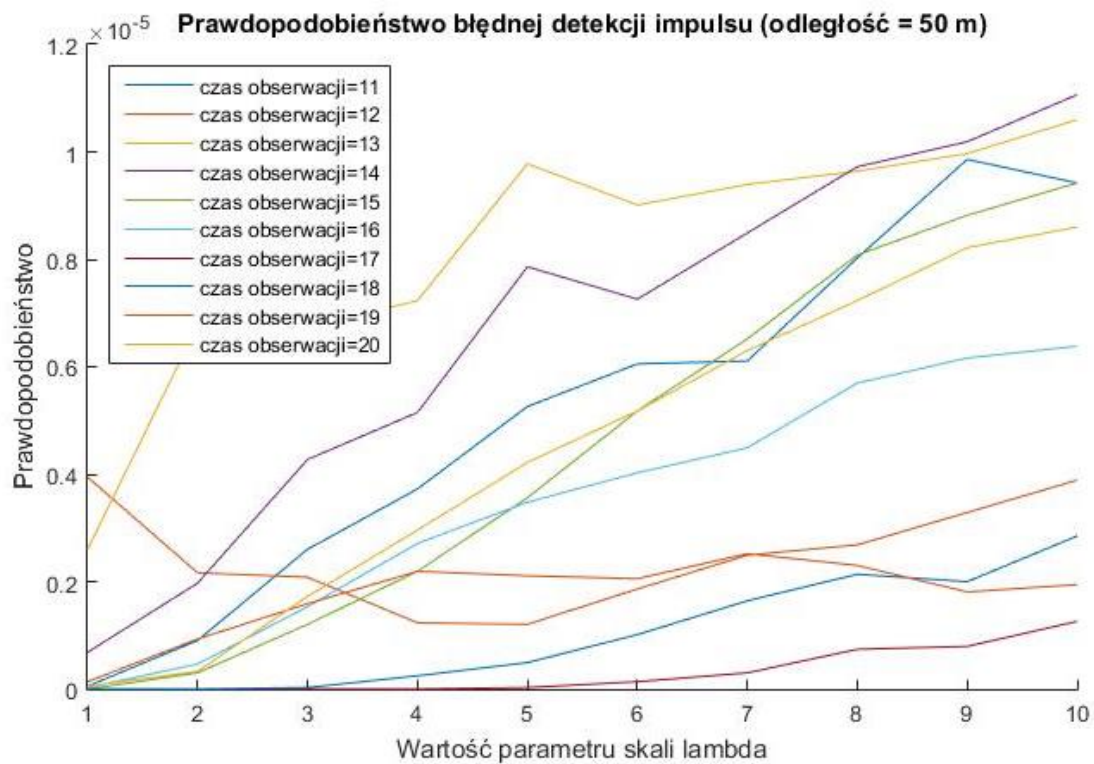
Rys. 7.9. Algorytm DFS z dłuższym czasem obserwacji



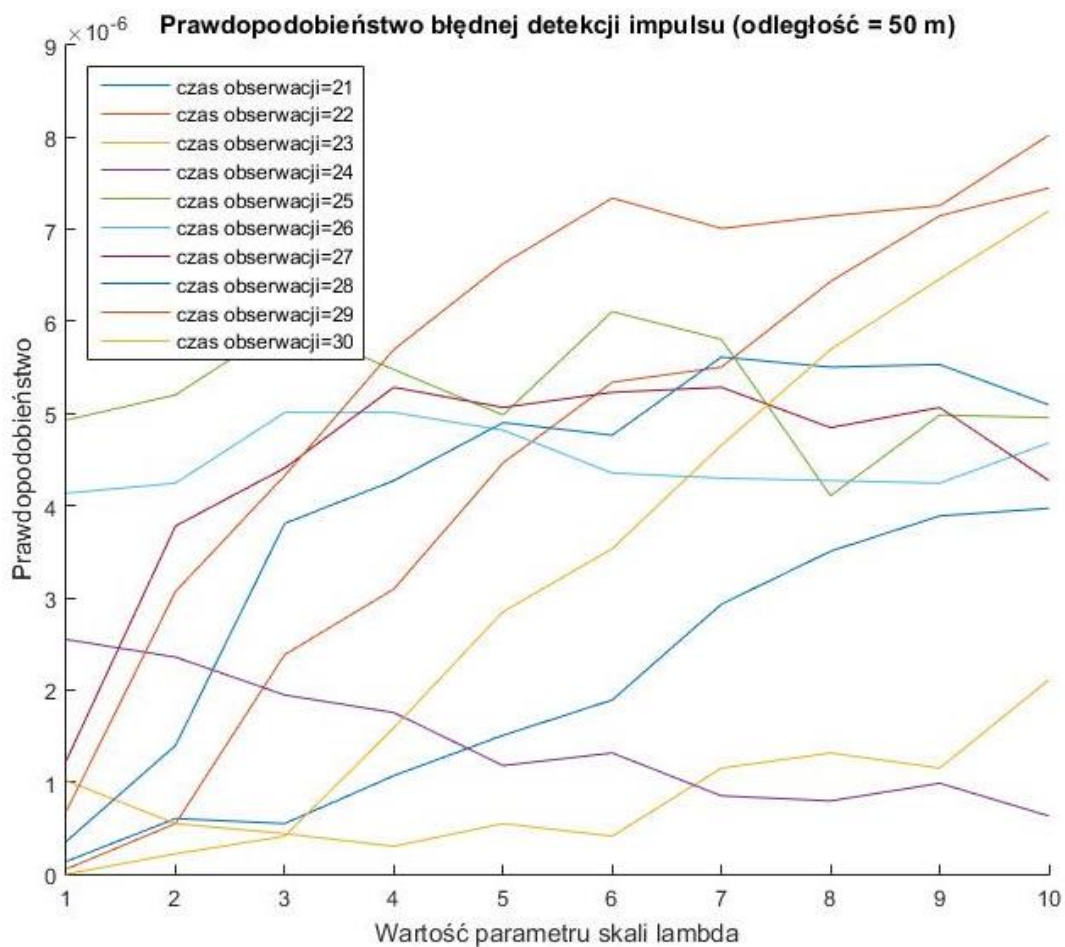
Rys. 7.10. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (1-3)



Rys. 7.11. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (4-10)

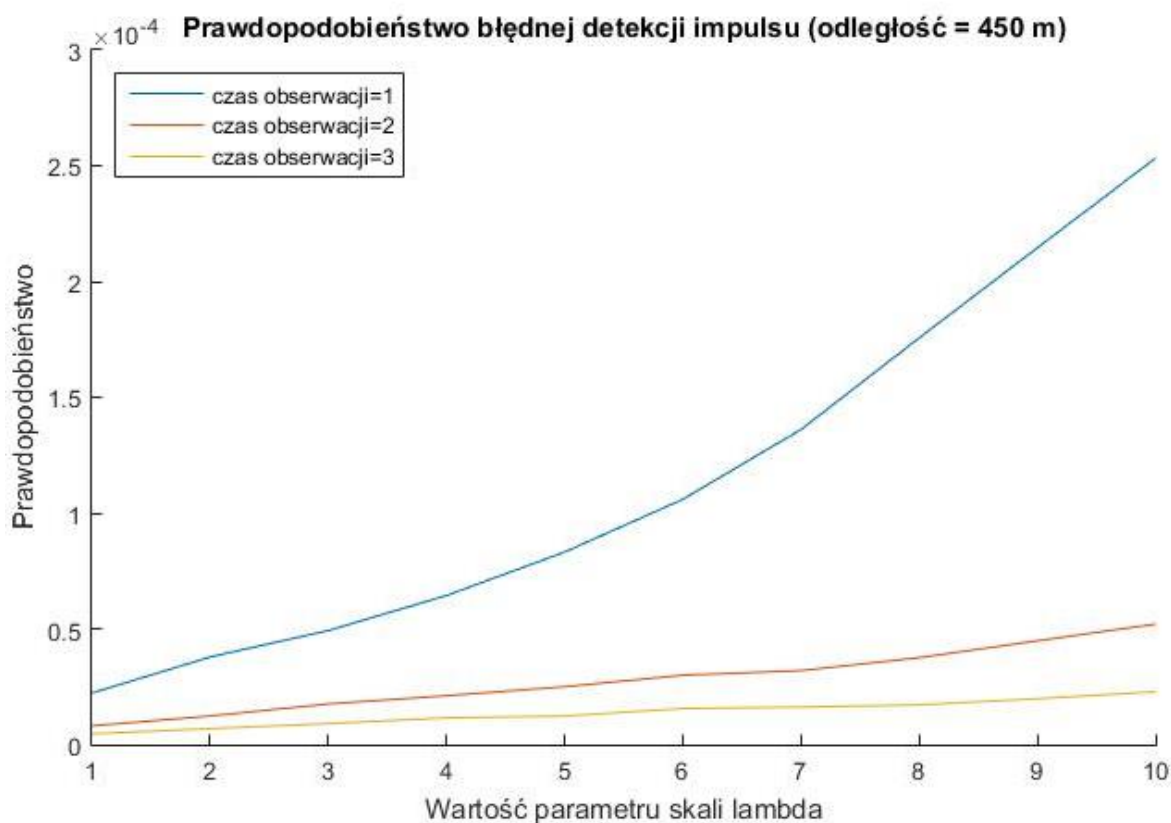


Rys. 7.12. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (11-20)

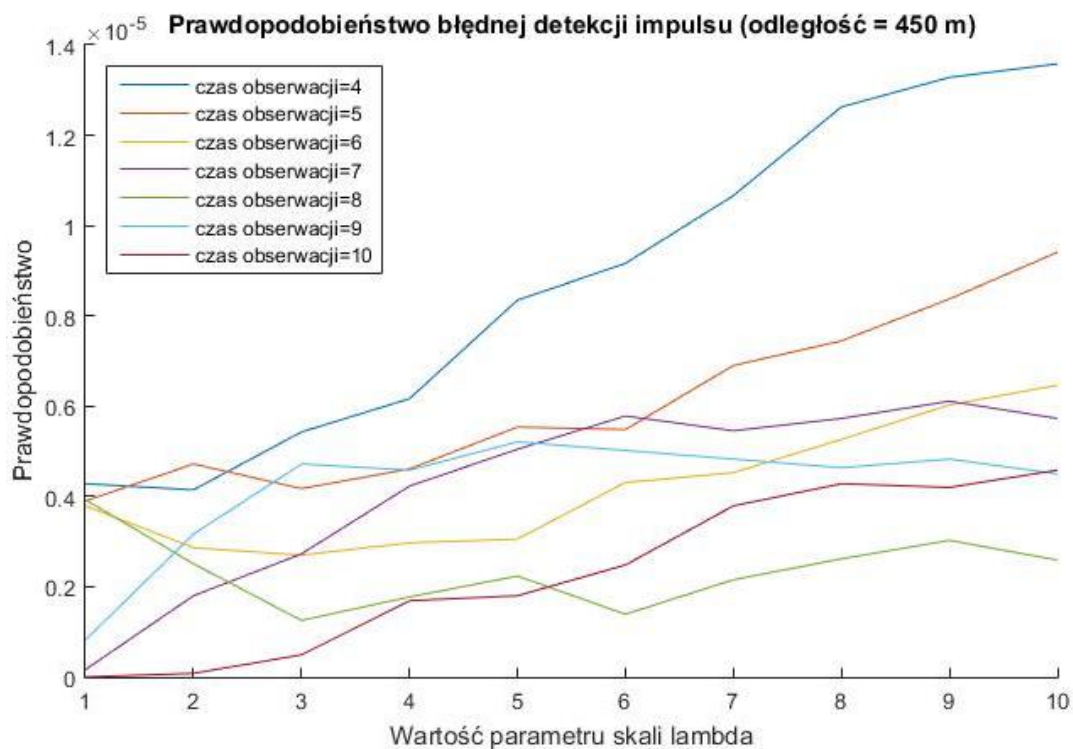


Rys. 7.13. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (21-30)

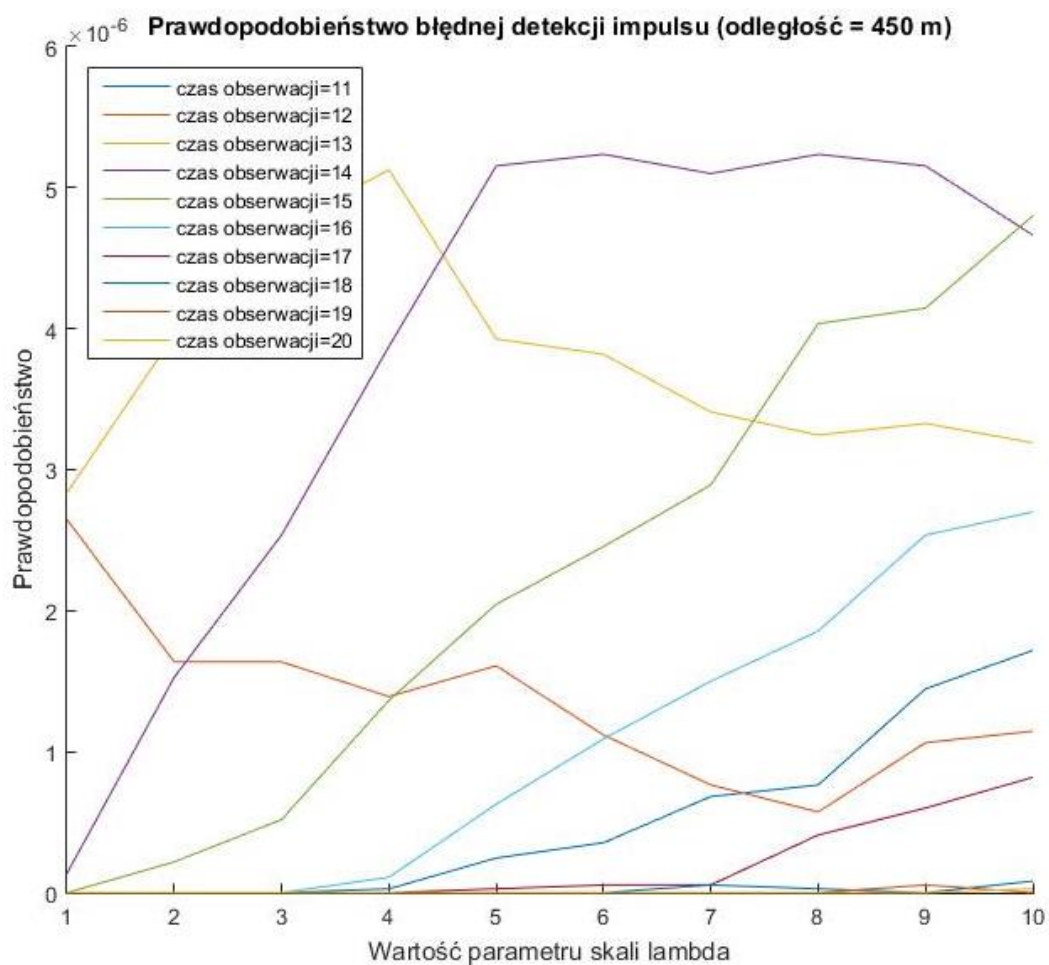
Na wykresach widoczne jest, że dla małych wartości czasu obserwacji prawdopodobieństwo fałszywego alarmu jest stosunkowo duże. Wraz z wydłużeniem czasu obserwacji maleje prawdopodobieństwo fałszywego alarmu, co jest efektem, jaki starano się osiągnąć. Przy czasie obserwacji 6 impulsów przed podjęciem decyzji prawdopodobieństwo błędnej detekcji spada około 100-krotnie dla przypadku z największą wartością parametru skali. Tym sposobem udało się wyeliminować zjawisko fałszywych alarmów spowodowanych dużymi chwilowymi wartościami szumu. Pojawiające się chwilowe wartości na rysunku 7.13 są spowodowane pojedynczymi losowymi błędnymi detekcjami w okolicy wystąpienia właściwego sygnału radarowego, są to błędy na poziomie pomijalnie małym i spowodują co najwyżej delikatnie wcześniejsze uruchomienie Non-Occupany Period. Rysunki od 7.14 do 7.17 przedstawiają również prawdopodobieństwo błędnej detekcji, ale dla odległości równej 450 m. Są one przedstawione w celu udowodnienia, że dla innych odległości ulepszenie wykorzystujące wydłużony czas obserwacji również działa prawidłowo.



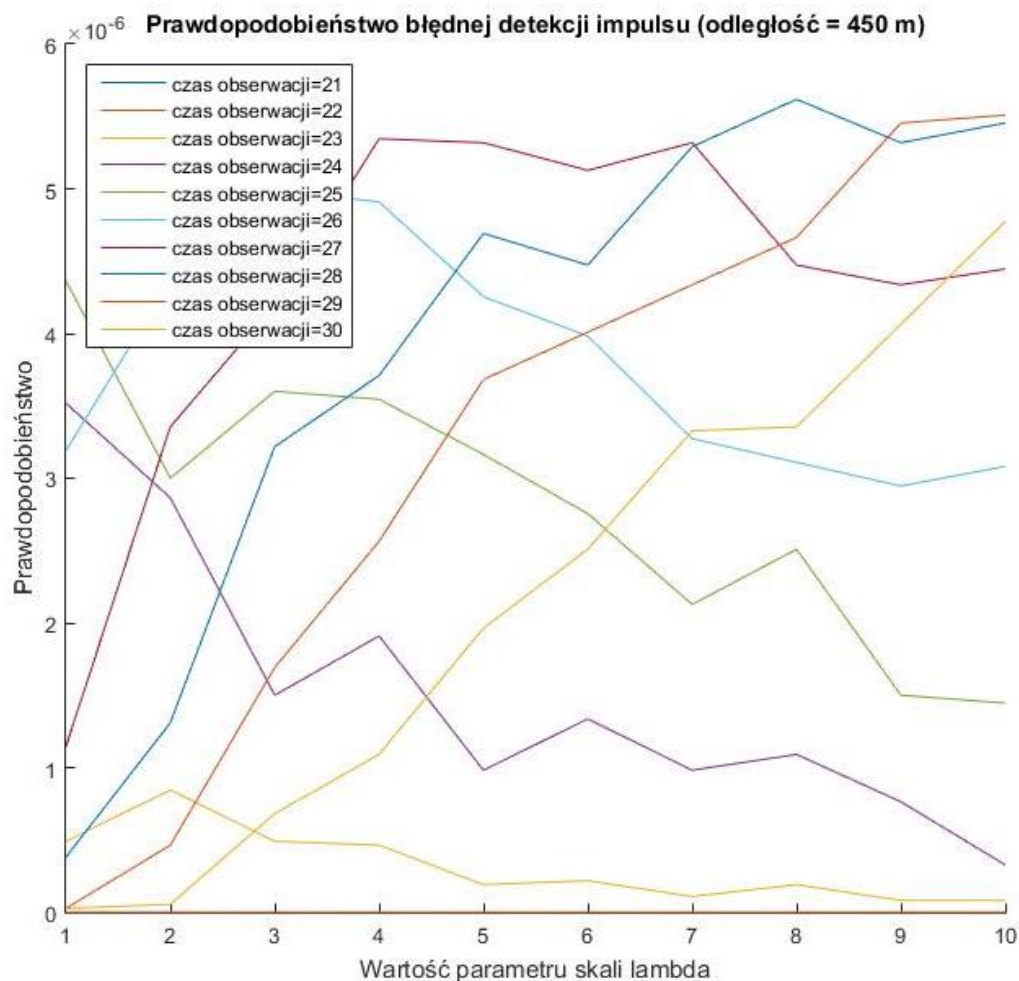
Rys. 7.14. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (1-3)



Rys. 7.15. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (4-10)

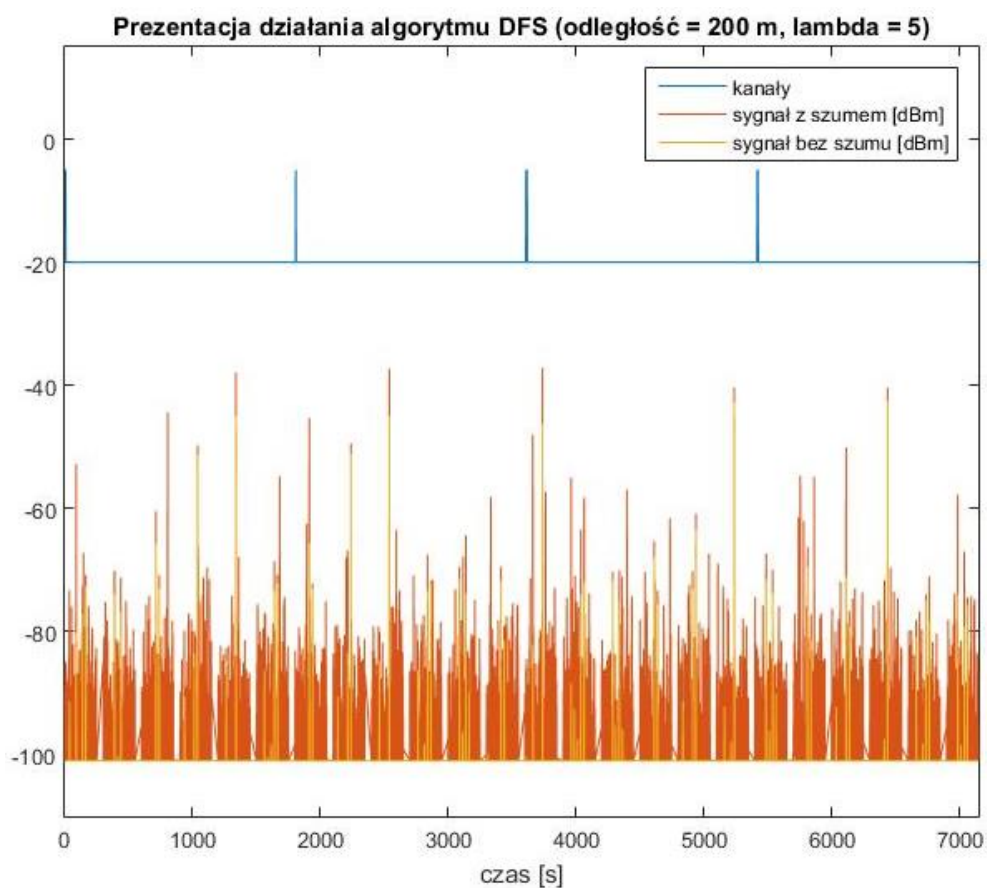


Rys. 7.16. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (11-20)

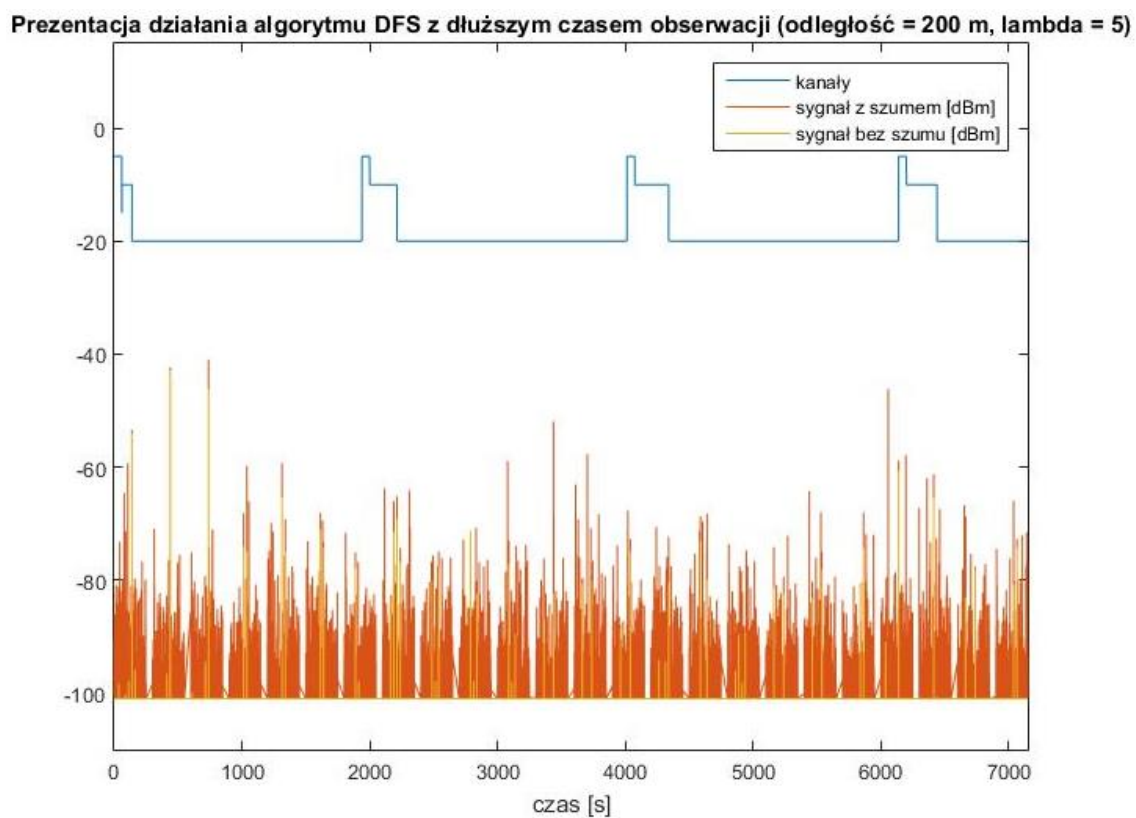


Rys. 7.17. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji w zależności od mocy szumu i czasu obserwacji (21-30)

Dodatkowo zostały przeprowadzone symulacje przy dłuższym czasie obserwacji, które potwierdzają skuteczność zaproponowanego ulepszenia. Rysunek 7.18 przedstawia scenariusz bez wprowadzonego mechanizmu dłuższego czasu obserwacji, natomiast rysunek 7.19 posiada zaimplementowany ten mechanizm. Dla obu symulacji odległość była równa 200 metrów, parametr skali równy wartości 5, a liczba impulsów powyżej -62 dBm, po których należy stwierdzić, że to sygnał radarowy (wartość czasu obserwacji) wynosiła 6 impulsów. Żółty wykres reprezentuje sygnał radarowy w przypadku, gdyby nie był do niego dodany logarytmicznie szum, a czerwony wykres jest sumą logarytmiczną sygnału radarowego i chwilowej mocy szumu.



Rys. 7.18. Prezentacja działania algorytmu DFS w wersji podstawowej dla odległości 200 m

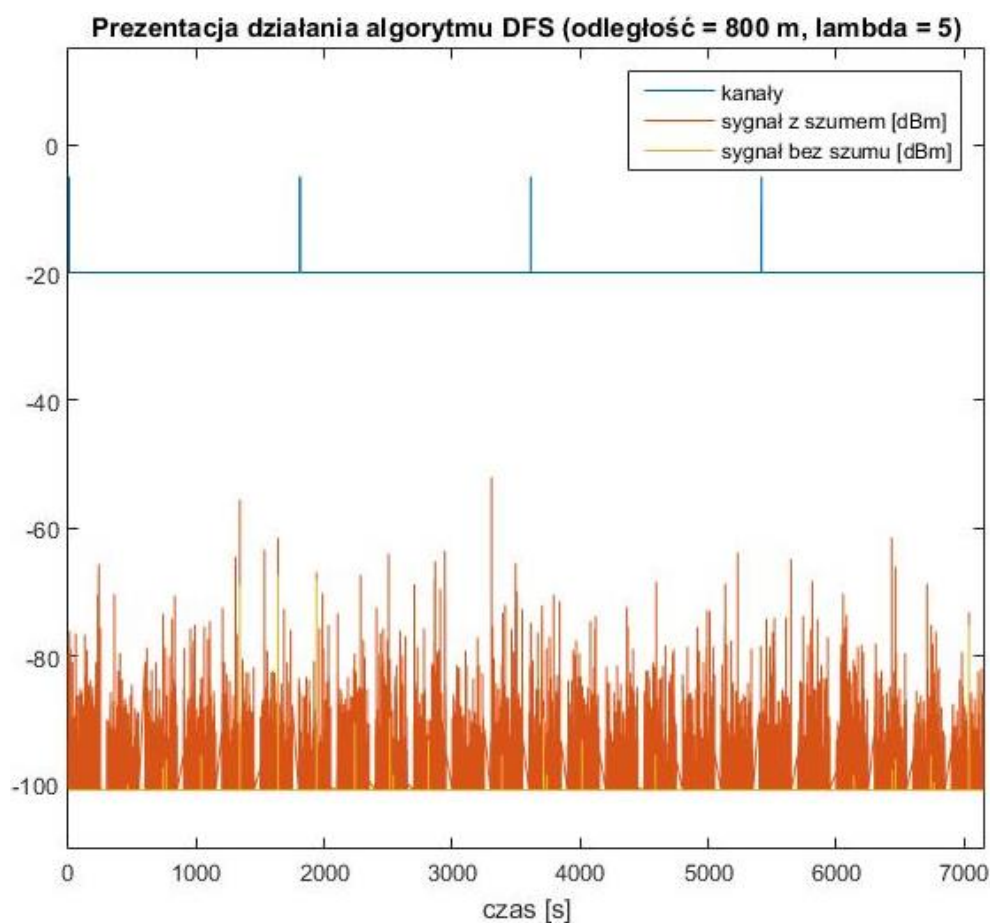


Rys. 7.19. Prezentacja działania algorytmu DFS z dodanym mechanizmem dłuższego czasu obserwacji dla odległości 200 m

Z wykresów można odczytać, że mechanizm dłuższego czasu obserwacji prowadzi do przzerwania transmisji w momencie, kiedy faktycznie wystąpi radar, a nie są to tylko wahania poziomu szumu. Dzięki niemu widoczna jest sytuacja, w której urządzenie rozpoczyna transmisję w momencie, kiedy nie ma na nim sygnału radarowego. Kanały przyjmują jedną z 4 wartości, która odpowiada 4 możliwym stanom kanału:

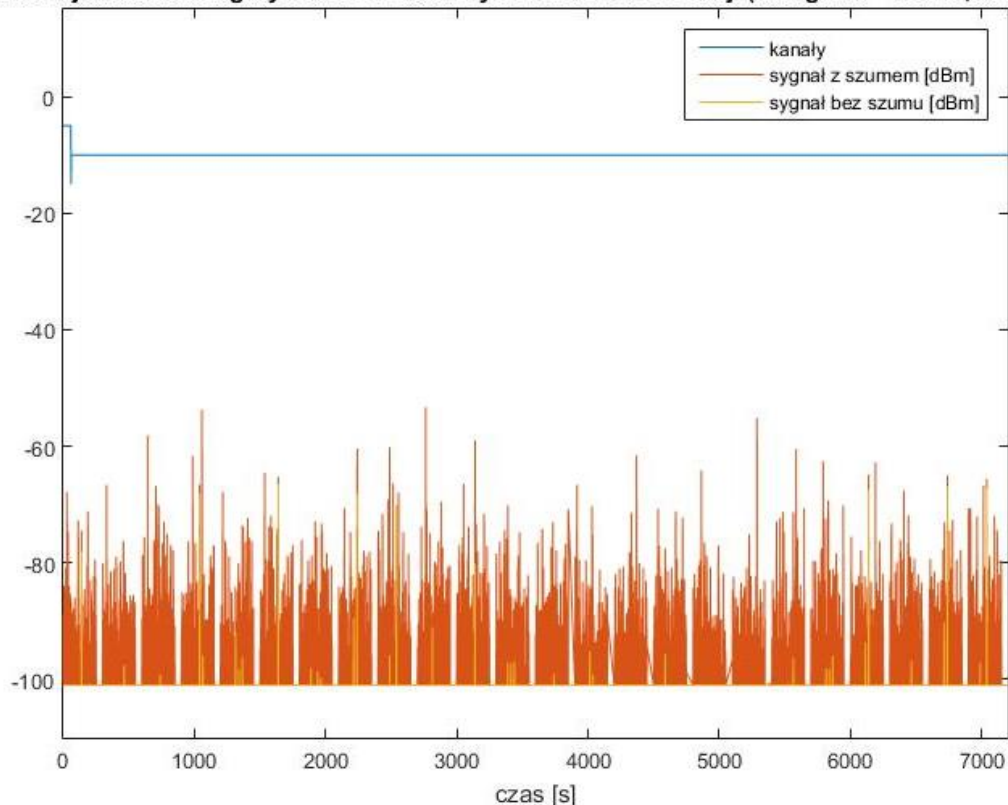
- wartość -20 odpowiada kanałowi niedostępnemu
- wartość -15 odpowiada kanałowi dostępnemu
- wartość -10 odpowiada kanałowi operacyjnemu
- wartość -5 odpowiada kanałowi użytkowemu

Rysunki 7.20 i 7.21 przedstawiają analogiczną sytuację jak powyżej z tą różnicą, że odległość została zwiększona do 800 m.



Rys. 7.20. Prezentacja działania algorytmu DFS w wersji podstawowej dla odległości 800 m

Prezentacja działania algorytmu DFS z dłuższym czasem obserwacji (odległość = 800 m, $\lambda = 5$)

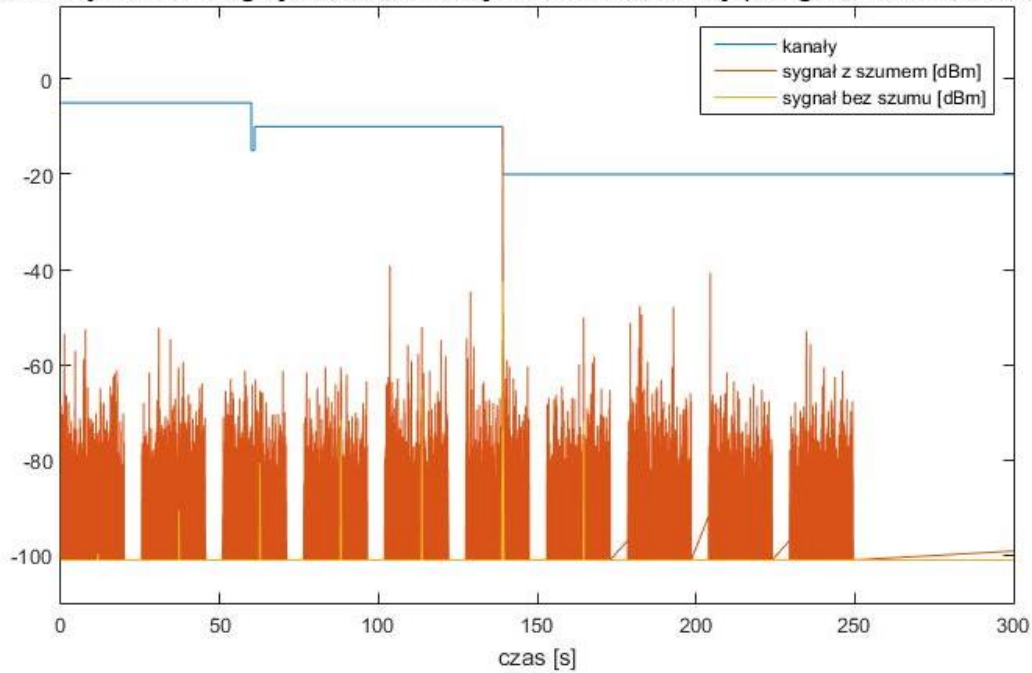


Rys. 7.21. Działanie algorytmu DFS z mechanizmem dłuższego czasu obserwacji dla odległości 800 m

W przypadku, gdy odległość wynosi 800 m jest jeszcze bardziej widoczne, że dłuższy czas obserwacji niweluje efekt dużej chwilowej wartości szumu. W dalszych odległościach od radaru sygnał przestaje przekraczać wartość -62 dBm, czyli w takich przypadkach urządzenie mogłoby nadawać w trybie ciągłym. Widoczne jest to na rysunku 7.21, na którym po przeprowadzonym początkowym mechanizmie CAC, urządzenie rozpoczęło nadawanie (wartość kanału -10, czyli kanał operacyjny).

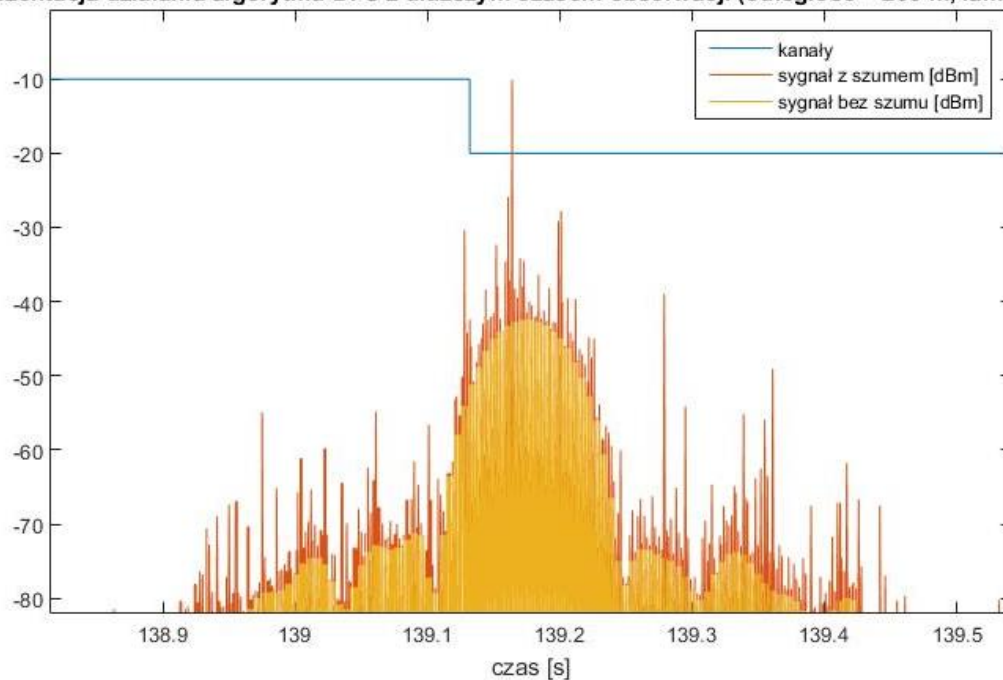
Ostatni scenariusz przedstawia dokładne szczytanie wartości po każdym kolejnym wydarzeniu czasowym, czyli reprezentuje każdą chwilę czasu. Ma to na celu przedstawienie, że algorytm faktycznie pomija impulsy szumu z mocą powyżej -62 dBm, a reaguje dopiero, gdy sygnał radarowy osiąga moc powyżej -62 dBm. Rysunek 7.22 przedstawia pełen czas symulacji dla tego scenariusza, czyli około 10 minut. Rysunek 7.23 przedstawia moment, kiedy następuje wykrycie sygnału radarowego.

Prezentacja działania algorytmu DFS z dłuższym czasem obserwacji (odległość = 200 m, $\lambda = 5$)



Rys. 7.22. Działanie algorytmu DFS z mechanizmem dłuższego czasu obserwacji dla czasu symulacyjnego około 10 minut

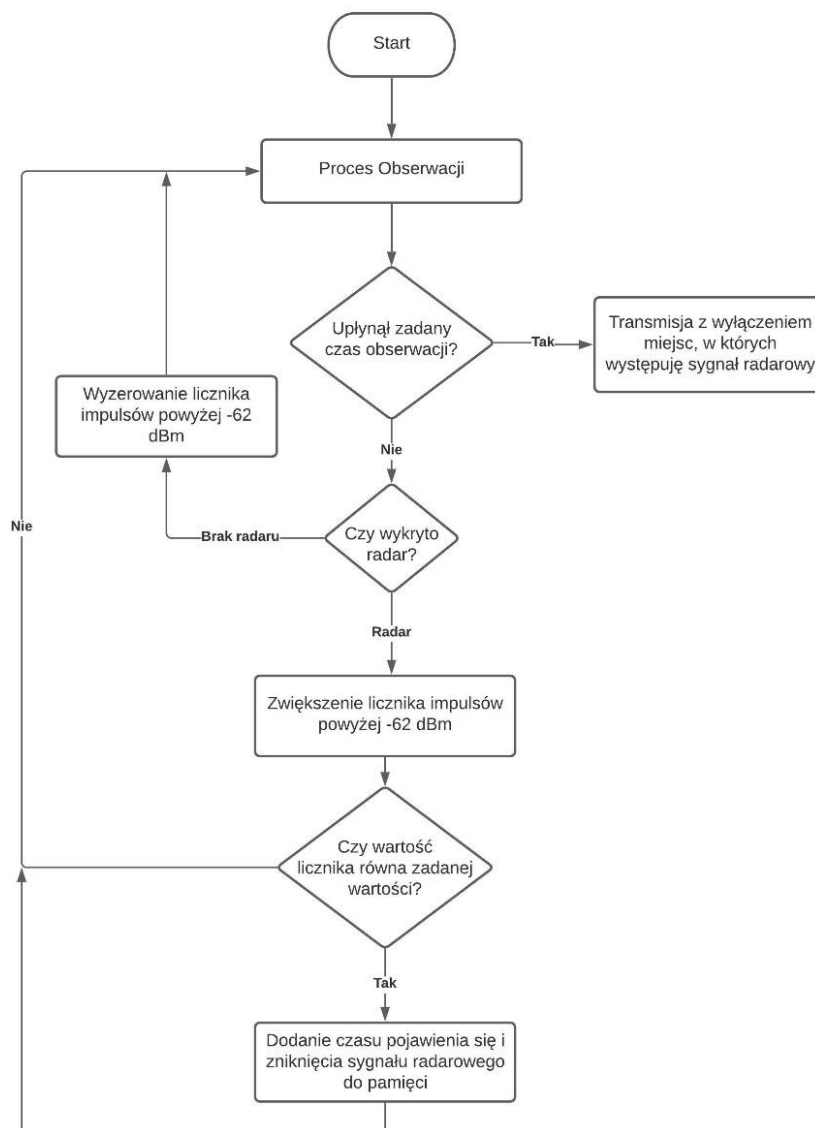
Prezentacja działania algorytmu DFS z dłuższym czasem obserwacji (odległość = 200 m, $\lambda = 5$)



Rys. 7.23. Prezentacja momentu zadziałania mechanizmu wyłączenia transmisji w chwili wykrycia radaru

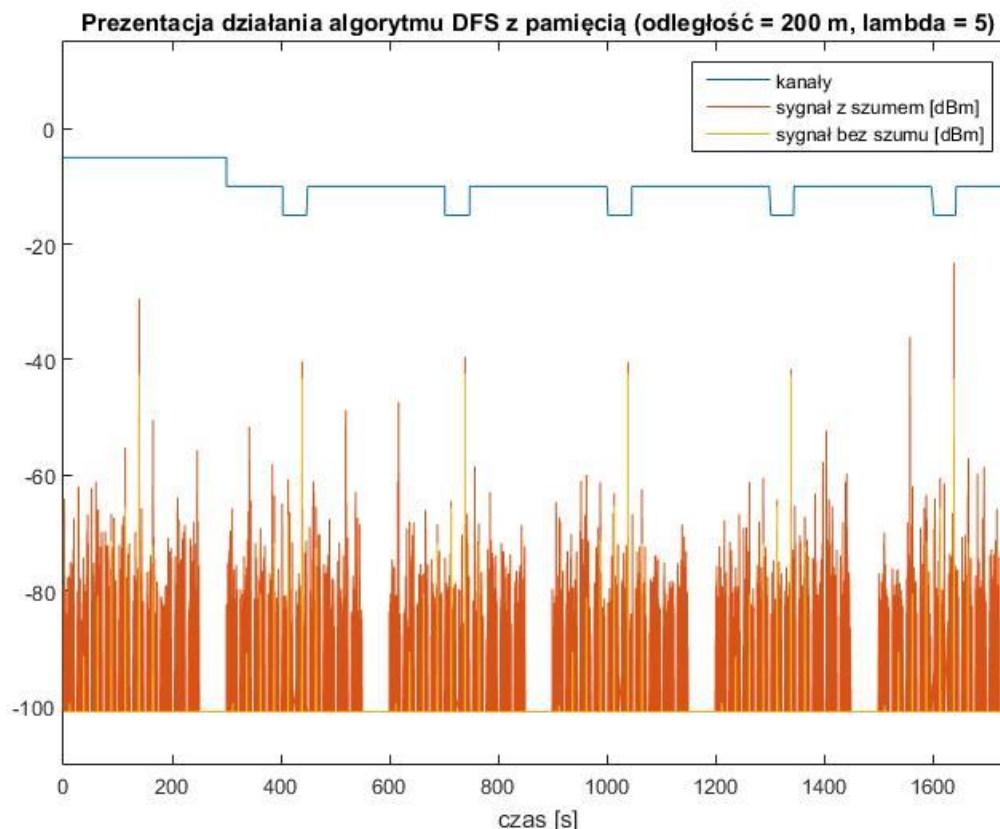
W momencie usunięcia problemu reagowania przez mechanizm DFS na dużą chwilową wartość szumu widoczna stała się charakterystyczna okresowość sygnału radarowego. Jest to szczególnie dobrze widoczne na rysunku 7.19, gdzie kolejne wystąpienia sygnału radarowego, a co za tym idzie wyłączenia transmisji pojawiają się w stałych odstępach

czasu. Korzystając z tej obserwacji zaproponowano drugie ulepszenie symulacyjne, które polega na dodaniu pamięci, która będzie przechowywała momenty wystąpienia sygnału radarowego. Następnie dzięki tej wiedzy będzie nadzorowała, kiedy należy wyłączyć transmisję, a kiedy można ją przywrócić, aby nie był uruchamiany mechanizm DFS. Rysunek 7.24 przedstawia algorytm mechanizmu DFS z dodaną pamięcią.



Rys. 7.24. Algorytm mechanizmu DFS z dodaną pamięcią

W tym ulepszeniu również jest wdrożony mechanizm dłuższego czasu obserwacji. Proces obserwacji trwa przez czas ustalony na początku symulacji. W momencie wykrycia radaru zostaje dodany do pamięci czas wystąpienia tego sygnału. Każdy kolejny pojawiający się sygnał radarowy będzie również zapisywany w pamięci do czasu, aż nie zostanie spełniony warunek końca obserwacji (koniec czasu obserwacji). Jeśli tak się stanie, to nastąpi transmisja z wyłączeniem miejsc, w których wystąpił sygnał radarowy. Rysunek 7.25 przedstawia wynik symulacji reprezentujący poprawne działanie tego mechanizmu. Czas symulacyjny wynosi około 30 minut.



Rys. 7.25. Działanie algorytmu DFS z pamięcią dla odległości 200

Widoczne jest na rysunku, że algorytm faktycznie zatrzymuje transmisję w momentach, kiedy zostanie wykryty sygnał radarowy. Ponadto został dodany dodatkowy przedział ochronny, który wynosi około 20 sekund. Zatrzymanie transmisji jest widoczne poprzez zmianę stanu kanału z wartości -10 (kanał operacyjny) do wartości -15 (kanał użyteczny). Symulacja prezentuje, że możliwe jest zaimplementowanie i wdrożenie takiego rozwiązania w rzeczywistym urządzeniu.

Oba zaproponowane ulepszenia poprawiły działanie algorytmu DFS poprzez zwiększenie jego wydajności dla urządzeń Wi-Fi™ i zmniejszyły czas, przez który urządzenie musi przejść w tryb wyłączenia. Po zastosowaniu obu ulepszeń udało się przejść ze stanu, gdzie nadawanie było praktycznie niemożliwe przez cały czas, do stanu, gdzie transmisja jest włączona przez zdecydowaną większość czasu.