



Zakłócenia radiowe powodowane przez stacje radarowe Woroneż-DM (Воронеж-DM, 77Я6DM)

Radio interference caused by Voronezh-DM radar

Jędrzej Marsz

Paweł Skrzypkowski

e-mail: sq2dk@gazeta.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni

Koło Naukowe Morski Klub Łączności SZKUNER SP2ZIE

As a part of preparations for setting the ground station for the planned PW-Sat3 student satellite, analysis of the spectrum in the 70cm band was made in Gdynia region by members of the science club. It was found out that very strong radio interference is present in this band. Interference was pinpointed to Voronezh-DM radar installed in about 2013 by the Russian military in the Kaliningrad Oblast. Measurements were made to determine the strength and characteristics of the signals emitted by this radar. The signal level in Gdynia region somewhat depends on propagation, but is always present, making receiving weak satellite signals difficult or impossible. Additionally, the potential effects of radar on signals received by satellite was analyzed. Evidence of problems in communications, which might originate from Voronezh-DM radar, in this frequency range in previous satellite missions was found and presented. Other Voronezh-DM radars in other parts of the globe are present, and although operating on slightly different frequencies might also influence satellite communication in the 70cm band.

Key words: cubesat, Voronezh-DM, UHF, 437MHz, PW-Sat3, radio interferences

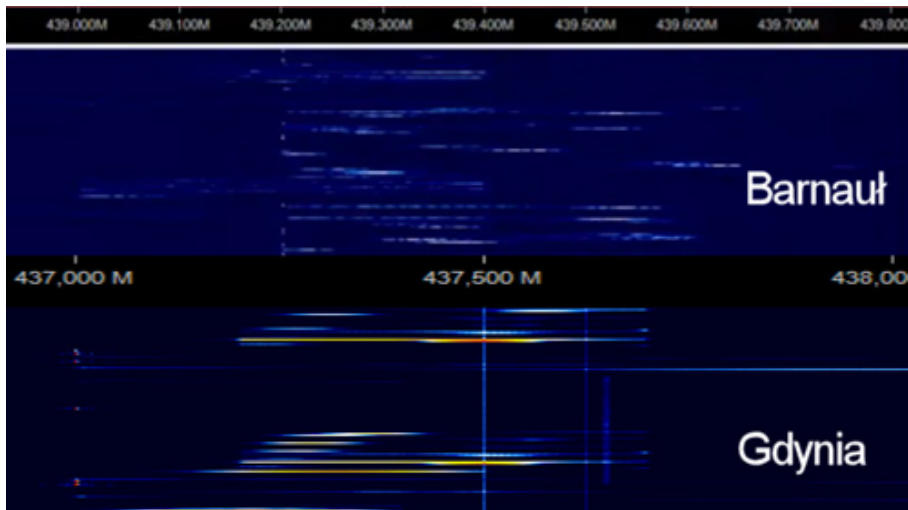
Wstęp

W ramach przygotowania do budowy i eksploatacji radiowej stacji naziemnej do komunikacji z planowanym satelitą PW-Sat3 członkowie Koła Naukowego Morski Klub Łączności SP2ZIE SZKUNER podjęli się zbadania spektrum radiowego częstotliwości planowanych do komunikacji z tym satelitą by ustalić warunki, jakie musi spełnić stacja. Wcześniejsze doświadczenia wskazywały na możliwość wystąpienia silnych zakłóceń na wybranej do komunikacji z satelitą PW-Sat3 częstotliwości. Wstępnie ustalono występowanie uciążliwych zakłóceń występujących w okolicach pasma 437 MHz – 438 MHz, często również występujących w szerszym paśmie 436 MHz – 439 MHz. Zakłócenia te występują w postaci silnego sygnału przemiatającego z dużą częstością (kilkadziesiąt razy na sekundę) powyższy zakres częstotliwości. Występują zarówno w dzień, jak i w nocy z niewielkimi zmianami intensywności, 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu. Mimo dużej siły zakłóceń, przy braku innego sygnału, przy użyciu normalnego radiotelefonu FM można ich nie zauważyć, są jednak nie do zignorowania w przypadku próby odbioru sygnałów zmodulowanych amplitudowo (AM/SSB). Wpływają bardzo istotnie na możliwość odebrania transmisji cyfrowych.

Jak wspomniano, zakłócenia te są obecne na dużej części polskiego wybrzeża środkowego i wschodniego. W głębi lądu siła sygnału zakłócającego spada, ale wciąż bywa dokuczliwa, nawet kilkadziesiąt kilometrów od wybrzeża.

Pomiary azymutu na maksimum sygnału wykonane z siedziby Koła Naukowego MKŁ Szkuner SP2ZIE w Gdyni wskazały, że źródło sygnału znajduje się na azymucie 065°-070° w stronę Helu, lub dalej w stronę Obwodu Kaliningradzkiego. Charakter zakłóceń oraz ich azymut wskazywał na możliwości ich pochodzenia z wojskowej instalacji radarowej, niestety nie udało się odnaleźć żadnych informacji potwierdzających tę hipotezę.

Analizując charakter sygnału zakłócającego, można się doszukać wyraźnych podobieństw do sygnału występującego w Kraju Ałtajskim w pobliżu miejscowości Barnauł (Aleksiej, 2016). Sygnał ten pochodzi od radaru Woroneż-DM (Воронеж-ДМ).



Rys. 1. Obraz spektrum z okolicy miejscowości Barnauł (Kraj Ałtajski) gdzie znajduje się radar Woroneż-DM (powyżej), oraz z Gdyni (poniżej)

Źródło: Aleksiej, 2016 (powyżej) oraz opracowanie własne (poniżej).

Opis i charakterystyka radaru Woroneż-DM

W latach 2011-2014 w pobliżu miejscowości Pionierskij (Пионерский) we współrzędnych $54^{\circ}51,44'N$ $20^{\circ}10,94'E$ w obwodzie Kaliningradzkim w Rosji, uruchomiono stację radarową Woroneż-DM (Воронеж-ДМ, 77Я6).



Rys. 2. Radar Woroneż-DM w Pionierskij w obwodzie Kaliningradzkim w trakcie konstrukcji. Tylko około 1/6 powierzchni antenowej obsadzona

Źródło: Wikipedia, b.d.

Stacje radarowe Woroneż (Воронеж) są stacjonarnymi radarami wojskowymi dalekiego zasięgu, przeznaczonymi do śledzenia celów powietrznych, balistycznych oraz kosmicznych (Wikipedia, b.d.).

W zależności od zakresu wykorzystywanych częstotliwości występują w odmianach M oraz VP (Воронеж-М, Воронеж-ВП) pracujących w zakresie fal metrowych, DM (Воронеж-ДМ) pracujący w zakresie fal decymetrowych oraz SM (Воронеж-СМ) w zakresie fal centymetrowych.

Anteny radarów są zespołem wielu dipoli w szyku fazowym, gdzie charakterystykę kierunkową zespołu anten kształtuje się cyfrowo poprzez sterowane przesunięcie fazowe poszczególnych anten.

Dokładne parametry stacji nie są znane publicznie. Poniższe informacje zgromadzone są na podstawie ogólnodostępnych artykułów oraz obserwacji własnych. Pewne informacje można również przyjąć zakładając duży stopień podobieństwa z radarem Vitim (РЛС „Витим”), który jest eksportową modyfikacją radaru Woroneż-DM o nieco innej konfiguracji, a dla którego podstawowe dane techniczne są dostępne (SRIL-DR, b.d.; RTI, b.d.).



Rys. 3. Radar Vitim - wizualizacja

Źródło: www.nidar.ru

W przeciwieństwie do systemu Woroneż-M, gdzie dobrze widoczne są wszystkie dipole w zespole antenowym, w systemie Woroneż-DM dipole znajdują się pod powierzchnią ochronną i można się tylko domyślać ich liczby, rozmieszczenia i kształtu. Można też sądzić, iż każda komórka składa się z pary dipoli polaryzacji przesunię-

tej o 90°. Wykorzystanie w szyku anten z ortogonalnymi polaryzacjami liniowymi umożliwi uzyskanie dodatkowych informacji o echu na podstawie analizy polaryzacji przychodzącego sygnału (Oljunin, 2011).

Zakładając maksymalny kąt odchylenia wiązki $\Phi=70^\circ$, to według wzoru (Rosu, b.d.):

$$d_{max} = \frac{\lambda}{1+\sin(\Phi)} \quad (1)$$

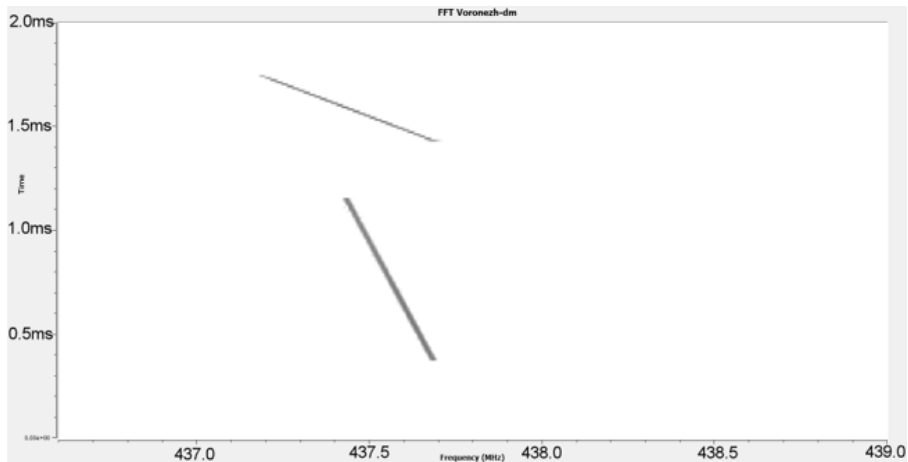
Dipole powinny być rozmieszczone w odległości $d_{max}=0,51\lambda$ (gdzie λ to długość fali) od siebie, więc około 0,34 m. Z analizy zdjęć można przyjąć, iż taka mniej więcej jest odległość między dipolami w pionie jak i poziomie.

Na podstawie zdjęć, można oszacować, iż system antenowy stacji Woroneż-DM w stanie pełnego obsadzenia (w zależności od konfiguracji) składa się z pola przeszło 2000 dipoli (prawdopodobnie 8x4 pola po 64 dipole, co w sumie daje 2048 dipoli). Oznacza to łączny zysk zespołu antenowego na poziomie 33dBd (nie uwzględniając strat). Wydaje się, że w zależności od potrzeb, stacja nie musi być wyposażona w pełen zestaw paneli (Rysunek 2 - stacja wyposażona tylko w 4 pola po 64 dipoli) umieszczony w prefabrykowanym budynku, zysk anteny może być w związku z tym niższy. Dla radaru Vitim rozmiar anteny podawany jest jako 16,8 m x 16,8 m, dla radaru Woroneż wynosi ona prawdopodobnie około 11,4 m x 22,2 m

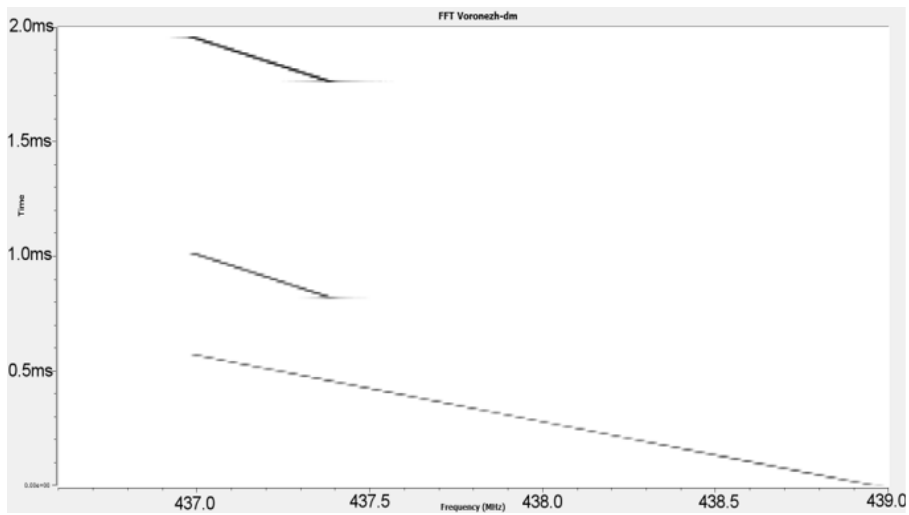
Moc wysokiej częstotliwości można szacować zakładając podobieństwo z radarem Vitim, na 100 kW (Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, b.d.; RTI, b.d.) (80 dBm), choć może ona być jeszcze wyższa, biorąc pod uwagę, iż deklarowany zasięg radaru Vitim to 4000 km a radaru Woroneż-DM to 6000 km. W oficjalnych danych podawane jest wyłącznie całkowite zapotrzebowanie energii na 0,6 MW. W rekomendacji ITU (ITU-R, 2019) radar typu „A”, do którego można zaliczyć Woroneż-DM może mieć moc od 1 MW do 5 MW.

Nadajnik pracuje w trybie ciągłym, ze zmienną częstotliwością (FM – modulacja częstotliwości), można więc przyjąć, iż jest to radar Dopplera lub „radar ćwierkający” (ang. chirp radar). Szerokość częstotliwościowa impulsu jest zmienna, ale przeciętnie waha się od 0,5 MHz do 2,0 MHz. Długość impulsu również jest zmienna i przeciętnie waha się od 0,5 ms do 2,0 ms.

Maksymalny zasięg radaru podawany jest na 6000 km, dotyczy to jednak obiektów kosmicznych na nie najniższych orbitach i jak należy się spodziewać, w przypadku dużych odległości, raczej obiektów o dużej powierzchni odbicia. Dla radaru Vitim zasięg podawany jest na 4000 km i dotyczy to celów o skutecznej powierzchni odbicia 5,0 m² (SRIL-DR, b.d.; RTI, b.d.).



Rys. 4. Przykładowy spektrogram sygnałów wysyłanych przez radar Woroneż

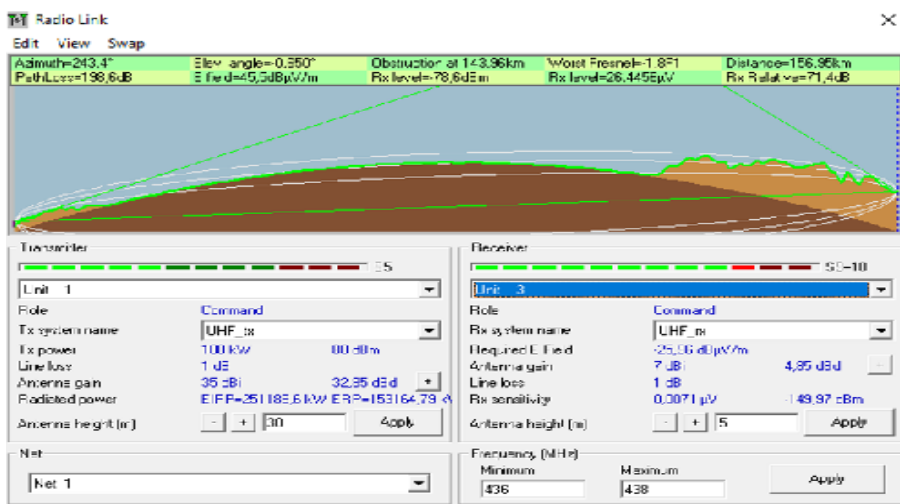


Rys. 5. Przykładowy spektrogram sygnałów wysyłanych przez radar Woroneż

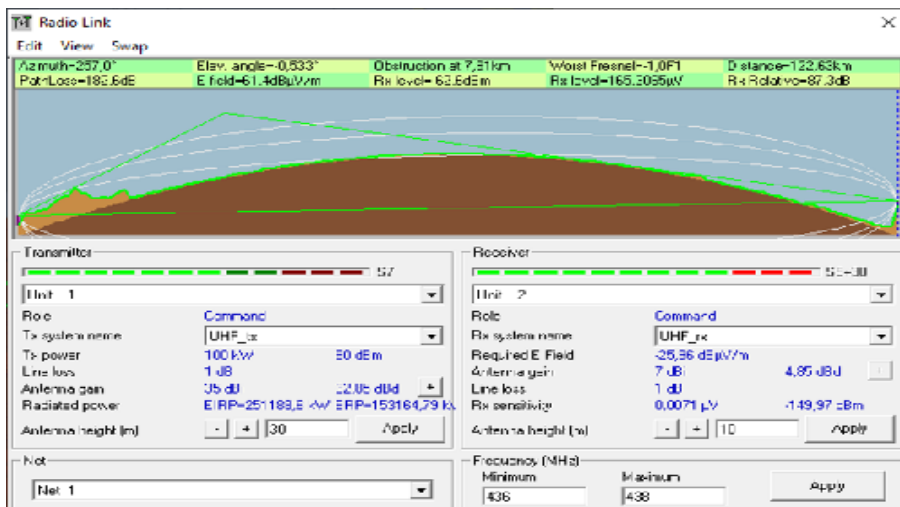
Radar Woroneż-DM wedle informacji dostępnych w sieci może skanować w azymucie w szerokości 120° ($\pm 60^\circ$ od linii symetrii) oraz w elewacji w zakresie od 2° do 60° (Wikipedia, b.d.). Pokrywa się to z obliczeniami wykonanymi wcześniej (wzór 1). W obwodzie kaliningradzkim radar ustawiony jest w osi 240° , tak więc może obserwować sektor od 180° do 300° , co odpowiada pokryciu zachodniej Europy od Grecji po Islandię.

Wyniki i analiza pomiarów

W ramach badań nad źródłem i charakterem zakłóceń uruchomione zostały przez członków Koła Naukowego Morski Klub Łączności SZKUNER SP2ZIE dwie stacje monitorujące spektrum z zakresu od 434,0 MHz do 440,0 MHz. Stacje te były zainstalowane w Redzie, 122 km w namiarze 255° od radaru i w Gołubiu 157 km w namiarze 242° od radaru. Wedle symulacji programem „Radio Mobile” (Coudé, b.d.) poziom sygnału w Redzie (przy bezpośrednim oświetleniu i nadajniku pracującym z maksymalną mocą) powinien wynieść około -63 dBm, a w Gołubiu -79 dBm.

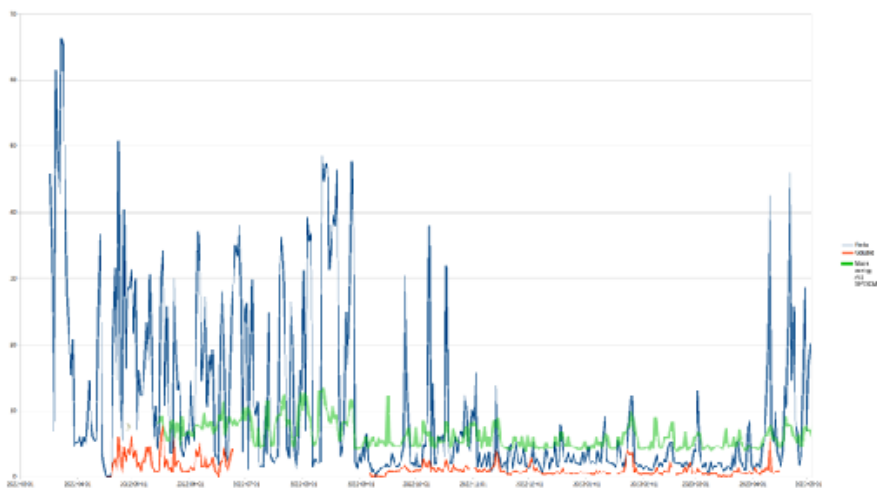


Rys. 6. Symulacja bilansu radiowego między Radarem a stacją w Gołubiu



Rys. 7. Symulacja bilansu radiowego między Radarem a stacją w Redzie

Pokrywa się to z wynikami obserwacji, gdzie w Gołubiu zaobserwowano dużo niższy poziom średniej intensywności sygnału niż w Redzie. Intensywność sygnałów w czasie w obu lokalizacjach wykazuje podobieństwa, choć w stacji bardziej oddalonej od radaru w pewnym stopniu zależy również od propagacji. Informacje o zajętości widma w postaci graficznej były zbierane od połowy marca 2022 w Redzie i od połowy kwietnia 2022 (z przerwami) w Gołubiu do maja 2023. Jak widać na poniższym wykresie (rys. 8), stopień zajętości widma jest bardzo duży i dotyczy właściwie całego okresu przedstawionego czasu (410 dni). Tylko w 38 dni zaobserwowano minimalny poziom, bądź brak zakłóceń od radaru, co daje przeszło 90% czasu z mniejszymi, bądź większymi zakłóceniami. Poziom zakłóceń dość istotnie waha się w czasie – wahania te mogą być spowodowane trybem pracy radaru, bądź też propagacją sygnału radiowego – szczególnie wystąpieniem refrakcji, bądź duktów troposferycznych. Aby te przypuszczenia zweryfikować, nałożono na wykres poziomu zakłóceń w paśmie 437 MHz wykres maksymalnego zasięgu stacji odbiorczej AIS znajdującej się w Gdyni (MarineTraffic, b.d.). Można zauważyć podobieństwa występowania maksimum tych dwu wykresów i na tej podstawie wywnioskować, iż poziom zakłóceń w paśmie 437 MHz w Redzie i w Gołubiu dość znacznie uzależniony jest od propagacji sygnału. Jest to zrozumiałe, gdyż w obu wypadkach źródło sygnału znajduje się pod horyzontem odbiornika.



Rys. 8. Średni dzienny stopień zajętości widma (skala umowna) z przedziału 437-438 MHz w okresie 20-03-2022 do 02-05-2023 w lokalizacji Reda (granatowy) i Gołubie (czerwony) oraz dla porównania zasięg odbiornika AIS SP2XDM (zielony)

Podczas nieco podniesionych warunków propagacyjnych w stacji w Redzie sygnał radaru z Kaliningradu praktycznie uniemożliwia odebranie jakichkolwiek innych sygnałów z pasma 437 MHz i bywa na poziomie -30 dBm.



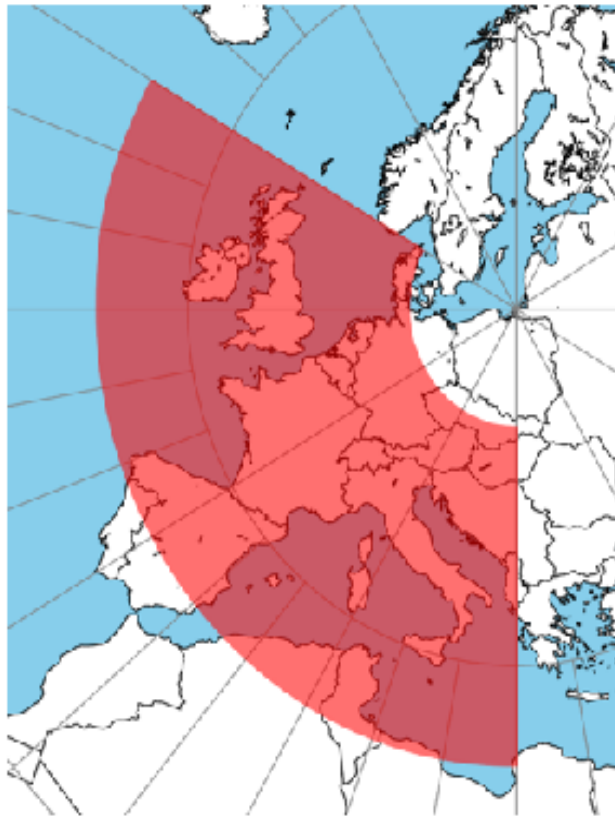
Rys. 9. Spektrogram widma odbieranego w Redzie. Zysk układu antenowego około 7 dBi

Wpływ zakłóceń na radiokomunikację satelitarną

Pasma 436 – 438 MHz, a więc na które przypada największa aktywność radaru z Kaliningradu w radiokomunikacji radioamatorskiej, jest przeznaczone dla radiokomunikacji satelitarnej (Rada Ministrów, 2017). Ze względu na stosunkowo korzystne parametry anten oraz dostępność sprzętu, jest to najchętniej wykorzystywane pasmo z dostępnych dla satelitów amatorskich. Niestety w przypadku aktywności tego radaru, w jego pobliżu odbiór słabych sygnałów z satelitów jest praktycznie niemożliwy. Pomimo tego, iż radar powinien promieniować z minimalnym kątem 2° nad horyzontem, w odległości przeszło 120 km, w elewacji $-0,5^\circ$ (pod horyzontem) sygnał tego radaru jest na tyle silnie odbierany, że nawet w przypadku użycia anten kierunkowych skierowanych z dala od radaru, uniemożliwia poprawny odbiór transmisji z satelitów wykorzystujących te same częstotliwości.

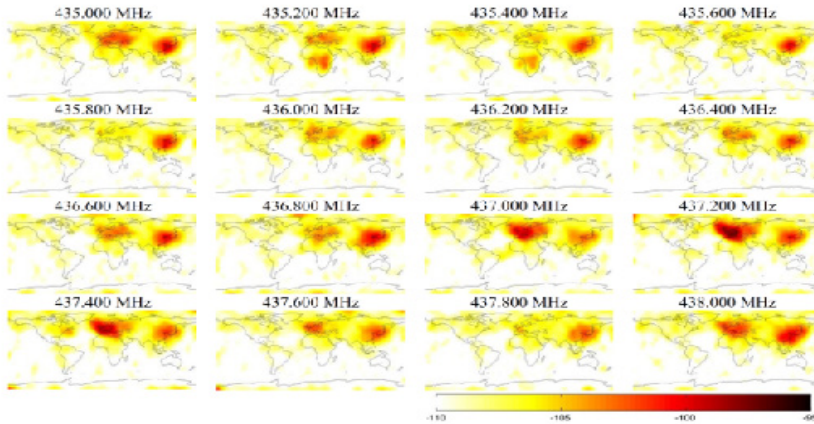
Ze względu na charakter oraz kąt promieniowania, sygnał tego radaru musi być również odbierany przez satelity, które wykorzystują to pasmo częstotliwości do komunikacji ze stacją naziemną (uplink). Biorąc pod uwagę ogromny wolumen przestrzeni, jaki radar musi zeskanować, można założyć, iż oświetlenie celu główną wiązką następuje dość rzadko i jest bardziej prawdopodobne na niskich elewacjach

(w większej odległości od radaru). Zapewne też skanowany jest tylko pewien sektor lub sektory z całego kąтового zakresu radaru, gdyż zeskanowanie całego obszaru z pełną rozdzielczością trwa zbyt długo. W przypadku oświetlenia satelity główną wiązką radaru poziom sygnału odbieranego przez satelitę będzie wynosić co najmniej -50 dBm. Zakładając standardowe parametry amatorskiej stacji naziemnej (moc 100 W, zysk anteny 18 dBi), można założyć, iż poziom sygnału odbieranego przez satelitę z takiej stacji będzie wynosił poniżej -85 dBm (szacunki dla satelity na niskiej orbicie kołowej o wysokości około 560 km).



Rys. 10. Obszar widzialności (występowania zakłóceń) satelity o orbicie kołowej o wysokości 565 km przez radar z Kaliningradu nadający na częstotliwości 437-438 MHz

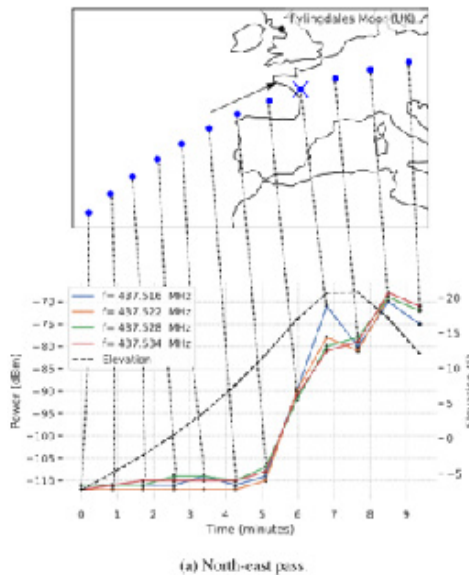
Dotychczasowe doświadczenia różnych ośrodków wykazały, że zachodzą duże problemy z komunikacją z satelitami w paśmie 437 MHz, czasami całkowicie uniemożliwiające skuteczną łączność dwukierunkową nad Europą (Busch i in., 2015; Quintana-Diaz i in., 2022; Quintana-Diaz i in., 2023; Buscher, 2019).



Rys. 11. Siła sygnału tła radiowego [dBm] pomiędzy 06.08.2014 a 11.08.2014

Źródło: Busch, 2016.

Jak można zauważyć z powyższego rysunku (Rys.11), nad prawie całą Europą w roku 2014 można było zaobserwować na częstotliwości 437,200 MHz bardzo silny poziom zakłóceń. Rozkład geograficzny i częstotliwościowy tych zakłóceń odpowiada wyżej przedstawionej charakterystyce radaru Woroneż-DM z Kaliningradu. Przy czym zakłócenia nad Europą niewidoczne są na częstotliwości 435,600 MHz.



Rys. 12. Przykładowy poziom zakłóceń zmierzony przez satelitę Serpens podczas jednego przelotu

Źródło: Quintana-Díaz G., Nodar-Lopez D., Gonzales A., Agelet F.A., Cappelletti C., Ekman T., 2022.

Na powyższym rysunku (Rys.12) zaznaczono pomiar zakłóceń w paśmie 437,5 MHz podczas przelotu satelity Serpens. Satelita ten znajdował się na niskiej orbicie, około 400 km nad Ziemią. Jak widać, zakłócenia silnie rosną nad Zatoką Biskajską, co pokrywa się z rozpoczęciem widzialności radaru z Kaliningradu. Pomierzony poziom sygnału wynosi -70 dBm, co jest dość bliskie naszym wcześniejszym wyliczeniom.

Wśród wspomnianych publikacji poruszających tematykę zbliżoną do omawianej (Busch i in., 2015; Quintana-Diaz i in., 2022; Quintana-Diaz i in., 2023; Buscher, 2019) brak jest wskazań na radar Woroneż-DM jako źródło zakłóceń, wynika to jednak prawdopodobnie z braku informacji o jego istnieniu i parametrach. Radary Woroneż-DM nie zostały uwzględnione w rekomendacji M.1462 ITU (ITU-R, 2019) i ich parametry oraz wpływ na poziom zakłóceń nie jest szerzej znany.

Rosja dysponuje całą siecią radarów typu Woroneż-DM i ciągle ją rozbudowuje (nowe radary mają powstać na Krymie) i choć nie jest jasne, na jakich częstotliwościach nadają pozostałe radary (zapewne są to częstotliwości podobne, lecz nieco inne), nawet w wypadku zmiany częstotliwości odbiorczej satelity (w ramach pasma 70 cm) można się spodziewać występowania zakłóceń w innych częściach globu. W chwili obecnej, poza radarem z okręgu Kaliningradzkiego, najbliższy zespół dwu radarów Woroneż-DM znajduje się Armawirze (Армавир) w kraju Krasnodarskim. Radary te (2 sztuki) pokrywają azymuty od około 065° do około 295°, tak więc również zachodnią Europę. Jeden z tych radarów nadaje najprawdopodobniej na częstotliwości około 431,500 MHz, nie jest jednak jasne, który dokładnie. Kolejnym radarem Woroneż-DM w Europie jest radar w okręgu Murmańskim w miejscowości Olenegorsk (Оленегорск) – jego parametry nie są znane, promieniuje jednak najprawdopodobniej w kierunku północno-zachodnim, także więc może wpływać na komunikację z satelitami nad obszarem północnej Europy.

Wnioski

Obserwacje i praca niniejsza powstały w ramach przygotowania do budowy stacji naziemnej dla planowanego satelity PW-Sat3. Niestety praca radaru Woroneż-DM z Kaliningradu stawia pod znakiem zapytania celowość powstania stacji naziemnej w siedzibie koła w Gdyni, dlatego też prowadzone były pomiary, by oszacować stosowność umiejscowienia stacji w Gołubiu, bądź w dalszej lokalizacji. O ile wpływ zakłóceń na stację naziemną można do pewnego stopnia wyeliminować, przez zmianę jej planowanego położenia, o tyle wpływ radaru na samego satelitę można by ograni-

czyć jedynie poprzez zmianę częstotliwości. Prawdopodobnie dla przyszłych satelitów korzystających z łączności w pasmach amatorskich, wskazane by było unikanie wykorzystywania pasma 437 – 439 MHz, a w przypadku uplinku pasma 70 cm (430 – 440 MHz) w całości. Jak wykazują wcześniejsze doświadczenia, niestety, można przewidywać duże problemy z komunikacją z planowanym satelitą PW-Sat3, który komunikację (uplink/downlink) ma realizować na częstotliwości 437,170 MHz, a więc w wycinku największej aktywności radaru z okręgu kaliningradzkiego.

Bibliografia

- Алексей RZ9YQ (Aleksiej RZ9YQ). (b.d.). «Воронеж-ДМ» Барнаул 438-439 MHz (*«Woroneż-DM» barnaul 438-439 MHz*). Pobrane z: <https://www.youtube.com/watch?v=FolQXg4RFOI>.
- Busch S., Bangert, P. , Dombrowski, S., Schilling K. (2015). UWE-3, In-Orbit Performance and Lessons Learned of a Modular and Flexible Satellite Bus for Future Pico-Satellite Formations. *Acta Astronautica*, 117, ss. 73-89.
- Busch, S. (2016). *Flexible and Efficient Design for Miniature Satellite Systems*. Würzburg: Uni Würzburg Research Notes in Robotics and Telematics.
- Buscher, M. (2019). *Investigations on the current and future use of radiofrequency allocations for small satellite operations*. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Coudé, R. VE2DBE. (b.d.). *Radio Mobile*. Pobrane z: <http://www.ve2dbe.com/english1.html>.
- ITU-R. (2019). *Recommendation M.1462: Characteristics of and protection criteria for radars operating in the radiolocation service in the frequency range 420-450 MHz*.
- MarineTraffic. (b.d.) Dane stacji AIS SP2XDM Gdynia. Pobrane z: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/stations/19011>.
- Олюнин Н. Н. (Oljunin, N.N.). (2011). *Использование поляриметрических данных радиолокационных станций дальнего обнаружения для распознавания целей (Ispolzowanije poljarimetriczieskich dannyh radiolokacionnyh stancij dalnegoobnaruzennja dlja raspoznawanja celej)*. Moskwa: WKA FR.
- Quintana-Diaz G., Ekman T., Camanzob A., Birkelandc R., Agra J.M.L., Muñod A.G., Agelet F.A. (2023). Satellite Uplink Interference Measurements in the 437 MHz UHF Amateur Radio Band Onboard LUME-1. *Acta Astronautica* 212, ss. 624-629.
- Quintana-Diaz G., Nodar-Lopez D., Gonzales A., Agelet F.A., Cappelletti C., Ekman T. (2022). Detection of radio interference in the UHF amateur radio band with the Serpens satellite. *Advances in Space Research*, Volume 69, Issue 2, ss. 1159-1169.
- Rada Ministrów (2017). *Krajowa Tablica Przeznaczeń Częstotliwości*.
- Rosu, I. YO3DAC/VA3IUL. (b.d.). *Phased Array Antennas*. Pobrane z: https://www.qsl.net/va3iul/Antenna/Phased_Array_Antennas/Phased_Array_Antennas.pdf.
- РТИ (RTI). (b.d.)/ *Радиолокационная станция «Витим» (Radiolokacionnaja stancija «Witim»)*. Pobrane z: <https://www.aorti.ru/competencies/radar-system/vitim/>.

Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications (SRIL-DR). (b.d.). *Радиолокационная станция «Витим» (Radiolokacionnaja stancija «Witim»)*. Pobrane z: http://www.niidar.ru/view_page/rls-vitim.html.

Wikipedia. (b.d.). *Voronezh radar*. Pobrane z: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Воронеж_\(радиолокационная_станция\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Воронеж_(радиолокационная_станция)).

