

Grzegorz GÓRAL **RADARY SUPERDARN – NARZĘDZIE DO BADANIA
I MONITOROWANIA ATMOSFERY ZIEMI
I PRZESTRZENI WOKÓŁZIEMSKIEJ****SUPERDARN RADARS – A TOOL FOR TESTING
AND MONITORING EARTH’S ATMOSPHERE
AND NEAR-EARTH SPACE****Wstęp**

Zainteresowanie badaczy zjawiskami i procesami zachodzącymi w jonosferze na średnich szerokościach geomagnetycznych znacznie w ostatnich latach wzrosło. Jest to efekt intensywnego rozwoju infrastruktury systemów komunikacyjnych, nawigacyjnych i innych wykorzystujących łączność satelitarną w tych strefach. Polska, mimo swego położenia, jest również obszarem, gdzie zwłaszcza w okresach wzmożonej aktywności słonecznej obserwuje się zjawiska pogody kosmicznej, w tym zorze polarne. Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie narzędzia umożliwiającego dokonanie znaczącego postępu w badaniach wpływu aktywności słonecznej na stan jonosfery i atmosfery – radaru SuperDARN. Przedstawione zostaną fizyczne podstawy funkcjonowania radaru, jego opis techniczny oraz wyniki obliczeń teoretycznych, określających potencjał obserwacyjny hipotetycznego urządzenia zlokalizowanego na terenie Polski. Powstanie takiego obiektu pozwoliłoby na włączenie Polski do międzynarodowej struktury badawczej oraz finalizację sieci radarowej na średnich szerokościach geomagnetycznych.

Radary SuperDARN (ang. *Super Dual Auroral Radar Network*) wykorzystywane są przez naukowców już dość długo. Pozwalają na badanie górnych warstw atmosfery (jonosfery/termosfery i mezosfery) i ich związków z magnetosferą i wiatrem słonecznym (Greenwald i in. 1995; Chisham i in. 2007; Lester

2008, 2013). Tematyka zagadnień możliwych do podjęcia jest bardzo szeroka i dotyczy nie tylko problemów kształtowania warunków w przestrzeni wokółziemskiej pod wpływem aktywności Słońca, lecz także oddziaływań mezosfery i termosfery z jonosferą, wielkoskalowej dynamiki atmosfery (pływy, fale akustyczno-grawitacyjne, fale planetarne), zmian klimatycznych w obu ośrodkach, kształtowania się globalnego obwodu elektrycznego Ziemi pod wpływem aktywności Słońca i planetarnej aktywności burzowej. Ponadto sieć SuperDARN umożliwia badanie wiatrów w mezosferze dzięki odbiciom od zjonizowanych ogonów meteoroidów (czyli od meteorów), a także monitorowanie wiatru i stanu powierzchni oceanicznej, jeśli dochodzi do odbicia sygnału radiowego od rozległych powierzchni wody.

Pojedyncze pole radarowe stacji zajmuje obszar 260 m na 140 m (dla zestawu szesnastu anten nadawczo-odbiorczych czterech anten interferometru odbiorczego), ale widać z niego odbicia z pikseli przestrzennych rozmiaru 30 km × 30 km, oddalonych radialnie od nadajnika o 200-3000 km, z rozszerzających się pasów o szerokościach do 1500 km (wycinek koła). Jest to zatem technika niezwykle efektywna, umożliwiająca stosunkowo tanim kosztem prowadzenie pomiarów na dużej przestrzeni. Jakkolwiek podstawowa rozdzielczość czasowa danych z całego pola sięga 1-2 minut, to dostępne są metody oferujące rozdzielczość sub-sekundową (Greenwald i in. 2008).

SuperDARN – radar rozpraszania koherentnego

Zasada działania tego typu radarów opiera się na zjawisku rozpraszania Bragga na strukturach przestrzennych, składających się z elementów poroziemieszczanych w równych odległościach, porównywalnych do długości fali sondującej. Dla pewnego zakresu długości fali sondującej, w przypadku obiektów charakteryzujących się okresową strukturą i stałymi odległościami pomiędzy elementami struktury, zachodzi koherentna superpozycja ech, co daje w efekcie wzmocnienie bądź osłabienie sygnału na drodze interferencji. W ten sposób można uzyskać wzmocnienie sygnału echa w kierunku odbiornika radaru. Z takim przypadkiem mamy do czynienia dla określonego stosunku długości fali sondującej do odległości pomiędzy elementami struktury obserwowanego obiektu:

$$d = \frac{\lambda_t}{2 \cdot \cos \theta}$$

gdzie: d – odległość między elementami struktury; λ_t – długość fali sondującej; θ – kąt padania (tutaj kąt pomiędzy płaszczyzną elementu struktury a kierunkiem padania fali).

W przypadku stosowanych częstotliwości od 8 do 22 MHz, daje to rozmiary rzędu kilku do kilkunastu metrów.

Charakterystyczną cechą nieregularności jonosferycznych jest ich zorientowanie wzdłuż linii pola magnetycznego. Z tego powodu wyemitowana przez radar fala powinna być ortogonalna do lokalnego pola geomagnetycznego, aby rozproszony sygnał miał możliwość powrotu do anteny. To stawia pewne wymagania co do wyboru regionów jonosfery odpowiednich dla obserwacji radarami rozpraszania koherentnego. Przykładowo, na dużych szerokościach, gdzie linie pola są niemal pionowe, niemożliwym staje się spełnienie warunku ortogonalności powyżej warstwy *E* (90-130 km). Przy częstotliwościach VHF i wyższych sygnał propaguje się w kierunku przestrzeni kosmicznej. Stosując częstotliwości z pasma HF, refrakcja jonosferyczna pozwala osiągnąć kryterium ortogonalności dla warstwy *E* i *F*. W przypadku zaistnienia w tym rejonie nieregularności jonosferycznych, nastąpi na nich rozproszenie sygnału radarowego w kierunku nadawania.

Budowa radaru SuperDARN

Poniższy opis konstrukcji i funkcjonalności przykładowego radaru SuperDARN odnosi się do działającej w Blackstone w stanie Virginia (USA) stacji radarowej HF. Schematy blokowe funkcjonalnych podzespołów radaru zostały przedstawione w pracy Greenwalda (2012).

Tor nadawczy

Blok generatora DDS (ang. *Direct Digital Synthesis* – metoda całkowicie cyfrowej syntezy przebiegu okresowego według przechowywanego w pamięci wzorca) jest odpowiedzialny za wytworzenie sekwencji impulsów, która przechodzi kolejno przez przełącznik nadawanie/odbiór. Następnie impulsy są formowane w szesnaście, wzajemnie opóźnionych fazowo, sygnałów w celu uzyskania odpowiedniego ukierunkowania wiązki. Opóźnienie między impulsami jest uzyskiwane w bloku macierzy fazowej (ang. *phasing matrix*). Kolejno sygnał przechodzi przez blok (ang. *combiner*), w którym składany jest z sygnałem pochodzącym z innego kanału (przy aktywnej funkcji Stereo; tryb Stereo polega na emitowaniu przez radar dwóch wiązek w różnych kierunkach i na różnych częstotliwościach). Blok *combinera* działa jak sprzęgacz po stronie odbiorczej. Następnie poziom sygnału jest zwiększany w odpowiednim wzmacniaczu do mocy ok. 0 dBm i kierowany do następnego przełącznika nadawanie/odbiór niskiej mocy, pozwalającego sygnałowi odebranemu na ominięcie wzmacniacza. Blok przełącznika zawiera również filtr górnoprzepustowy dla poprawy jakości

sygnału docierającego lub wychodzącego z macierzy fazowej. Kolejno sygnał jest wzmacniany do wartości mocy żądanej na wyjściu. Pierwszy stopień – przedwzmacniacz – pozwala na płynną regulację wzmocnienia od 0 do 26 dB. Dwa kolejne stopnie – pośredni i końcowy – ustalają moc na wyjściu. Przy wartości 0 dBm na wejściu przedwzmacniacza, maksymalna moc wyjściowa nadajnika wynosi w praktyce 0,5-0,6 kW. Poziom mocy sygnału wyjściowego i sygnału odbitego jest kontrolowany przez czujnik, w celu określenia czy wzmacniacz pracuje prawidłowo. W razie przekroczenia zadanego poziomu mocy sygnału odbitego, wzmacniacz zostaje wyłączony. Następnie sygnał jest podawany na ostatni przełącznik nadawanie/odbiór dużej mocy, za którym ma miejsce kolejny pomiar poziomu mocy sygnału. Wynik tego pomiaru w połączeniu z wynikiem pomiaru pierwszym czujnikiem stanowi dla kontrolera informację o stanie przełącznika nadawanie/odbiór dużej mocy. W razie stwierdzenia jego uszkodzenia, kontroler mierzy poziom mocy przed przełącznikiem, a odłącza pomiar za nim. Na końcu każdy z sygnałów składowych przechodzi w swoim torze przez filtr dolnoprzepustowy w celu odcięcia wyższych harmonicznych i niedopuszczenia ich do anten. Zadaniem kontrolera jest również dostarczanie użytkownikowi informacji o stanie poszczególnych bloków nadajnika. Istnieje również możliwość nadzoru nad nadajnikiem przy pomocy dedykowanego oprogramowania, pracującego na zdalnym komputerze, łączącego się za pomocą odpowiedniego interfejsu.

Tor odbiorczy

Odebrany przez antenę sygnał początkowo przechodzi przez opisaną w poprzednim podrozdziale część nadawczą. Następnie jest rozdzielany w *splitterze* pomiędzy dwa kanały. Te dwa odbiorcze kanały są identyczne za wyjątkiem częstotliwości lokalnego oscylatora. Kolejno sygnał przechodzi przez macierz fazową w celu usunięcia opóźnień fazowych. Gdy wszystkie szesnaście sygnałów składowych ma już jednakowe fazy, są one łączone w jeden sygnał wypadkowy. Po zsumowaniu przechodzi on przez przełącznik nadawanie/odbiór znajdujący się pomiędzy końcowymi stopniami odbiornika a blokiem DDS. Kolejno w torze odbiorczym pojawia się trójmodułowa sekcja złożona z miksera, banku filtrów i wzmacniacza. Mikser składa się z przedwzmacniacza, którego zadaniem jest zmniejszenie negatywnych skutków strat w mikserze i innych częściach odbiornika. Na wyjściu miksera pojawia się częstotliwość pośrednia o wartości 40,625 MHz.

Sygnał z miksera przechodzi przez bank filtrów w celu usunięcia niepożądanych składowych częstotliwościowych, pochodzących z procesu składania sygnału w mikserze. Filtry wąsko- i szerokopasmowy mają odpowiednio 7 kHz i 20 kHz szerokość widma. Te parametry odpowiadają stosowanej 100 μ s i 300 μ s

szerokości impulsów sondujących (co przekłada się na rozdzielczość odpowiednio 15 km i 45 km w określaniu odległości z jakiej pochodzą echa radarowe). Filtr 1 MHz jest dobrany do ciągu impulsów występującego w radarze SuperDARN. Należy w tym miejscu wspomnieć, że są one pogrupowane w sekwencje (najczęściej w liczbie siedmiu impulsów) o zmiennym okresie powtarzania. Ma to na celu wyeliminowanie błędów odczytu, związanych z niejednoznacznością pomiaru odległości wywołaną przez nakładanie się ech pochodzących od różnych impulsów i od różnych źródeł rozproszenia. Ostatnim ze wspomnianego zestawu jest filtr dziewięciopasmowy stosowany przy wyznaczaniu prędkości Dopplera. W ostatniej sekcji toru odbiorczego poziom sygnał jest zwiększany we wzmacniaczu częstotliwości pośredniej a następnie, zależnie od danego rozwiązania konstrukcyjnego, wytłumiany. Tłumienie może być realizowane w zakresie od 10 dB do 70 dB z krokiem co 10 dB. Tak przygotowany sygnał podlega obróbce cyfrowej w celu odzyskania użytecznej informacji oraz zapisowi do pamięci nieulotnej. Podstawowymi produktami uzyskiwanymi z pomiaru radarem są wartości składowej radialnej prędkości Dopplera obiektów na drodze wiązki sondującej (informujące o ruchach plazmy jonosferycznej), informacje o rozmyciu widma prędkości Dopplera (będące wskaźnikiem charakteru lokalnej konfiguracji pola geomagnetycznego) oraz moc odebranego echa (zależna od rozkładu gęstości elektronów w sondowanym obszarze) (McWilliams i in. 2003). Istnieją specjalne tryby pracy, bazujące na analizie przebiegu czasowego amplitudy i fazy „surowych” danych z odbiornika, które pozwalają na zwiększenie rozdzielczości czasowej pomiaru prędkości Dopplera do wartości 200 ms (Yukimatu, Tsutsumi 2002).

Podobny tor odbiorczy ma interferometr radaru SuperDARN, uzyskujący informację o kącie elewacji z jakiego pochodzi echo. Jednakże w tym przypadku sygnał odebrany nie przechodzi przez część nadawczą, gdyż interferometr służy jedynie do nasłuchu. Aby skompensować wynikającą stąd różnicę w fazie sygnału, przechodzi on przez przesuwnik fazy. Jeśli wszystkie tory kablowe łączące różne bloki systemu są tej samej długości, to sygnały z głównego systemu antenowego i z interferometru dotrą do odbiornika z tym samym przesunięciem fazowym względem siebie. Anteny główne i anteny interferometru dzieli odległość kilkudziesięciu metrów, stąd sygnał zostanie odebrany przez interferometr z pewnym opóźnieniem względem anten głównych. Skala różnicy w fazie jest miarą kąta elewacji.

System antenowy

Głównym systemem antenowym radaru SuperDARN jest pojedynczy liniowy szysk, na który składa się szesnaście, rozstawionych w stałych odstępach, modyfikowanych anten dipolowych, pełniących rolę anten elementarnych

z reflektorem ograniczającym wiązkę tylną (Sterne 2010). Stosowane są też konstrukcje radarów SupeDAR z droższymi i bardziej podatnymi na warunki atmosferyczne antenami log-periodycznymi. Uzupełnieniem głównego systemu antenowego jest interferometr, na który składa się układ czterech (analogicznych jak w głównym układzie antenowym) anten elementarnych.

Omawiany radar z Blackstone wykorzystuje fazowanie liniowe. Tor nadawczy radaru składa się z szesnastu nadajników półprzewodnikowych o mocy 600 W każdy. Za zastosowaniem tej metody kształtowania wiązki przemawia szereg faktów. Po pierwsze, elektroniczne sterowanie kształtem wiązki może być osiągnięte na drodze regulacji prądu pobieranego przez każdy z elementów instalacji antenowej. Taka wiązka może być w sposób natychmiastowy (w czasie rzędu milisekund) przekierowana na inny rejon obserwacji bez użycia jakichkolwiek rozwiązań mechanicznych. Po drugie, szesnaście wiązek zapewnia stosunkowo duże pole widzenia radaru (rzędu 50°). Po trzecie, każda z anten ma osobny nadajnik, co oznacza dysponowanie znaczną mocą przez każdy z torów nadawczych. Antena fazowana odznacza się również większą, w porównaniu do anten reflektorowych, elastycznością, ale też złożonością konstrukcji. Zadaniem matrycy fazowej jest zapewnienie, by sygnał w każdym z torów antenowych był w odpowiedniej fazie. Sygnał dostarczany jest do anteny z nadajnika poprzez linie doprowadzające. Opisywany radar SuperDARN wypromienia szesnaście wiązek składowych, które sumując się „w powietrzu” tworzą wiązkę wypadkową o kierunku elewacji uzależnionym od wzajemnych opóźnień fazowych sygnałów w torach antenowych.

Modelowanie pola widzenia

Jednym z kluczowych problemów przy wyborze lokalizacji dla nowej stacji SuperDARN jest określenie jej potencjału obserwacyjnego. Zależy on od lokalnej konfiguracji pola geomagnetycznego, bieżącej struktury jonosfery i częstotliwości roboczej nadajnika. Wstępnego określenia warunków pracy planowanego radaru można dokonać przy użyciu oprogramowania do ray tracingu (Jones, Stephenson 1975) wyznaczającego ścieżkę propagacji impulsu emitowanego przez radar. Na tej podstawie wyznaczane są punkty, w których wektor falowy jest prostopadły do lokalnego pola magnetycznego Ziemi. Taki warunek pozwala na uzyskanie rozproszenia sygnału radarowego emitowanego przez antenę z powrotem w kierunku nadajnika. Symulacje nie obejmują takich parametrów sygnału sondy, jak kształt impulsu i jego parametry czasowe.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki symulacji dla hipotetycznego radaru SuperDARN zlokalizowanego w województwie świętokrzyskim. Podobne obliczenia przeprowadzane były dla radarów Syowa South (Ogawa i in. 1990) oraz Hokkaido (Nishitani, Ogawa 2005). Do symulacji użyto algoryt-

mu *ray tracingu* w ośrodku będącym modelem jonosfery (IRI-2012). Celem prac było otrzymanie potencjalnych obszarów źródeł echa dla założonych warunków propagacji sygnału sondującego.

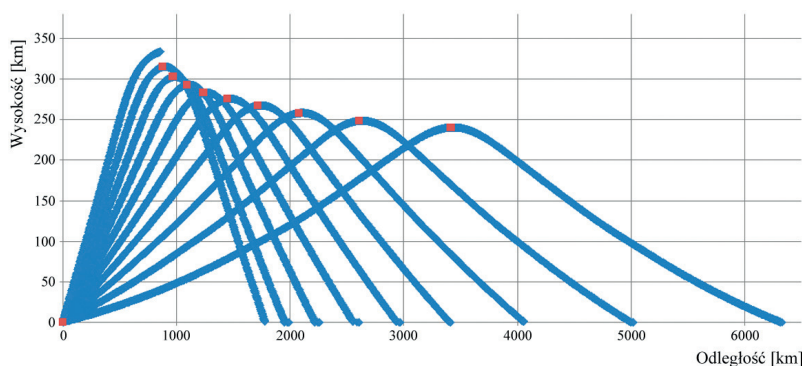
Opis modelu

Wykorzystany w obliczeniach algorytm pozwala na śledzenie ścieżek promienia przy założonym modelu jonosfery i pola geomagnetycznego. Algorytm pozwala na wybranie pozycji nadajnika, określenie jego częstotliwości pracy oraz kierunku (w azymucie i elewacji) propagacji emitowanego sygnału. Użytkownik ma możliwość zdefiniowania modelu jonosfery (dostępne modele analityczne lub bazujące na danych z pomiarów – np. International Reference Ionosphere). Uwzględniane są efekty związane z polem magnetycznym. W opisanym przypadku jako źródło danych o medium propagacji przyjęto empiryczny model jonosfery IRI-2012 (Bilitza i in. 2014) oraz model pola geomagnetycznego IGRF (Thébault i in. 2015).

Wyniki symulacji

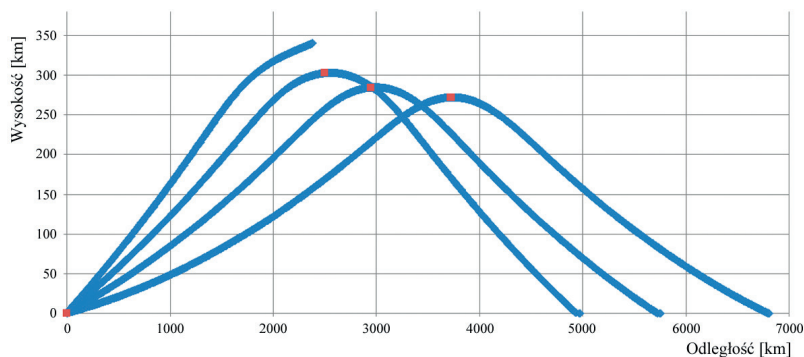
Na rysunku 1 pokazano przykładowe wyniki obliczeń dla warunków powstawania echa w przypadku sygnału wysłanego z hipotetycznego radaru zlokalizowanego w rejonie Włoszczowej ($50^{\circ}51'N$ $19^{\circ}58'E$) (informacja własna od Anny Odzimek). Na osi poziomej zaznaczono odległość od nadajnika zaś na osi pionowej wysokość od powierzchni Ziemi. Analizowano wiązkę ułożoną pod kątem -73° do północy geograficznej, w warunkach kątów elewacji z zakresu od 5° do 60° (z krokiem co 5°). Częstotliwość pracy nadajnika została ustawiona na 9 MHz. Za czas obserwacji przyjęto 16 marca 2015 r., 22:00 UT. Punktami zaznaczono miejsca, w których wektor falowy jest ortogonalny do lokalnego wektora pola geomagnetycznego, co umożliwiłoby zaobserwowanie w tych miejscach nieregularności jonosferycznych w przypadku ich zaistnienia. Na rysunku 2 przedstawiono efekt zwiększenia częstotliwości pracy do 16 MHz, która w danych warunkach skutkuje tendencją do penetracji jonosfery przez emitowaną falę i „ucieczką” bez spełnienia kryterium ortogonalności.

Na rysunku 3 zobrazowano poziomy rozkład potencjalnych źródeł silnego echa jonosferycznego (zaznaczonych krzyżykami miejsc, w których wektor falowy jest ortogonalny do lokalnego wektora pola geomagnetycznego) dla zorientowania osi radaru w kierunku -40° do północy geograficznej (pozostałe parametry jak w przypadku rysunku 1). Na rysunku 4 widać poziomy rozkład echa dla przypadku, w którym impuls radaru propaguje się przez ośrodek ulegający nagłemu zaburzeniu (parametry pracy radaru jak poprzednio).



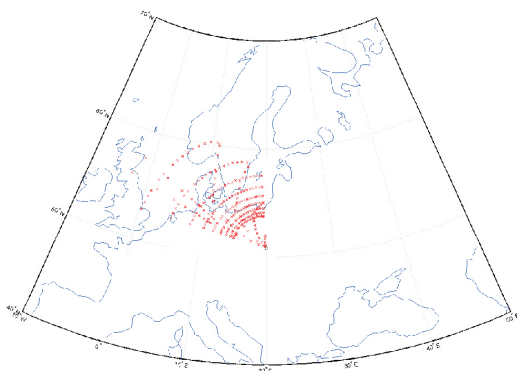
Rys. 1. Ścieżki promienia dla opisanego w artykule przypadku symulacji pracy radaru HF; częstotliwość pracy 9 MHz, oś radaru -40° ; czerwone punkty oznaczają miejsca, gdzie wektor fali jest prostopadły do lokalnego pola geomagnetycznego, co pozwala na obserwację nieregularności jonosferycznych w tych miejscach (obliczenia własne)

Fig. 1. Ray paths for the simulation of HF radar described in the article; operating frequency 9 MHz, radar axis -40° ; red dots indicate places where the wave vector is perpendicular to the local geomagnetic field, which allows the observation of ionospheric irregularities in these places (own calculations)



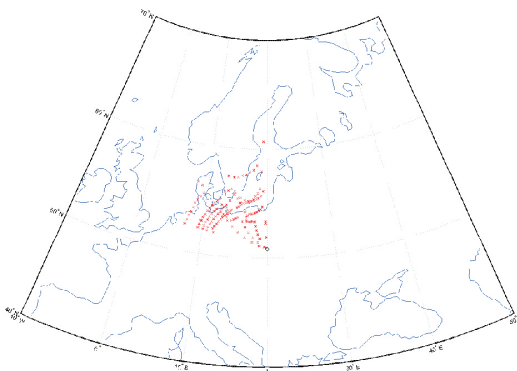
Rys. 2. Ścieżki promienia dla opisanego w artykule przypadku symulacji pracy radaru HF; częstotliwość pracy 16 MHz, oś radaru -40° ; czerwone punkty oznaczają miejsca, gdzie wektor fali jest prostopadły do lokalnego pola geomagnetycznego, co pozwala na obserwację nieregularności jonosferycznych w tych miejscach (obliczenia własne)

Fig. 2. Ray paths for the simulation of HF radar described in the article; operating frequency 16 MHz, radar axis -40° ; red dots indicate places where the wave vector is perpendicular to the local geomagnetic field, which allows the observation of ionospheric irregularities in these places (own calculations)



Rys. 3. Poziomy rozkład potencjalnych miejsc powstawania silnego echa radarowego od nieregularności jonosferycznych; częstotliwość pracy 9 MHz, oś radaru -40° ; czerwone krzyżyki oznaczają miejsca, gdzie wektor fali jest prostopadły do lokalnego pola geomagnetycznego, co pozwala na obserwację nieregularności jonosferycznych w tych miejscach (obliczenia własne)

Fig. 3. Horizontal distribution of potential places for the formation of strong radar echoes from ionospheric irregularities; operating frequency 9 MHz, radar axis -40° ; red crosses indicate places where the wave vector is perpendicular to the local geomagnetic field, which allows the observation of ionospheric irregularities in these places (own calculations)



Rys. 4. Poziomy rozkład potencjalnych miejsc powstawania silnego echa radarowego od nieregularności jonosferycznych dla przypadku jonosfery zaburzonej; częstotliwość pracy 9 MHz, oś radaru -40° ; czerwone krzyżyki oznaczają miejsca, gdzie wektor fali jest prostopadły do lokalnego pola geomagnetycznego, co pozwala na obserwację nieregularności jonosferycznych w tych miejscach (obliczenia własne)

Fig. 4. Horizontal distribution of potential places for the formation of strong radar echoes from ionospheric irregularities for the disturbed ionosphere case; operating frequency 9 MHz, radar axis -40° ; red crosses indicate places where the wave vector is perpendicular to the local geomagnetic field, which allows the observation of ionospheric irregularities in these places (own calculations)

Tutaj źródłem zaburzenia jest silna burza magnetyczna z dnia 17 marca 2015 r., zwana w literaturze „Burzą Św. Patryka” (Wu i in. 2016). Zmiany w strukturze ośrodka propagacji skutkują modyfikacjami w rozkładzie i spadkiem liczby punktów, dla których spełnione jest kryterium ortogonalności, co przekłada się na deformację i zawężenie pola widzenia rozpatrywanej stacji radarowej.

Podsumowanie

Warunkiem otrzymania rozproszenia sygnału w jonosferze jest, obok spełnienia kryterium ortogonalności, występowanie nieregularności jonosferycznych w warstwie *F*. W przeciwnym razie nie uzyskamy echa radarowego. Obserwacje wspomnianych zjawisk na średnich szerokościach geomagnetycznych zostały potwierdzone w pracach Hosokawa, Nishitani (2010), de Larquier i in. (2011), Clausen i in. (2012), czy Ribeiro i in. (2012). Przedstawione wyniki symulacji pokazują, że w przypadku proponowanej lokalizacji stacji SuperDARN (Włoszczowa w województwie świętokrzyskim), możliwe jest, przy założeniu odpowiedniej częstotliwości pracy, uzyskanie korzystnych warunków do obserwacji nieregularności występujących w jonosferycznej warstwie *F* (w niezaburzonych geomagnetycznie warunkach) w odległości od 500 do 3500 km od nadajnika. W sytuacji wystąpienia zaburzeń jonosfery należy liczyć się ze znacznymi zmianami pola obserwacyjnego radaru.

L i t e r a t u r a

- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B., 2014, The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, DOI: 10.1051/swsc/2014004
- Bristow W.A., Yee J.-H., Zhu X., Greenwald R.A., 1999, Simultaneous observations of the July 1996 two-day wave event using the Super Dual Auroral Radar Network and High-Resolution Doppler Imager, *Journal of Geophysical Research*, 104 (A6), 12715-12721, DOI: 10.1029/1999JA900030
- Chisham G., Lester M., Milan S.E., Freeman M.P., Bristow W.A., Grocott A., McWilliams K.A., Ruohoniemi J.M., Yeoman T.K., Dyson P.L., Greenwald R.A., Kikuchi T., Pinnock M., Rash J.P.S., Sato N., Sofko G.J., Villain J.-P., Walker A.D.M., 2007, A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions, *Surveys in Geophysics*, 28 (1), 33-109, DOI: 10.1007/s10712-007-9017-8
- Clausen L.B.N., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Thomas E.G., Shepherd S.G., Talaat E.R., Bristow W.A., Zheng Y., Coster A.J., Sazykin S., 2012, Large-scale

- observations of a subauroral polarization streams by midlatitude SuperDARN radars: Instantaneous longitudinal velocity variations, *Journal of Geophysical Research*, 117 (A5), DOI: 10.1029/2011JA017232
- Greenwald R.A., 2012, Steering SuperDARN radars – tutorial, dostępne online: http://vt.superdarn.org/tiki-download_file.php?fileId=1060 (09.08.2019)
- Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., Pinnock M., Jones T.B., Thomas E.C., Villain J.-P., Cerisier J.-C., Senior C., Hanuise C., Hunsucker R.D., Sofko G., Koehler J., Nielsen E., Pellinen R., Walker A.D.M., Sato N., Yamagishi H., 1995, DARN/SuperDARN A global view of the dynamics of high-latitude convection, *Space Science Reviews*, 71 (1-4), 761-796, DOI: 10.1007/BF00751350
- Greenwald R.A., Oksavik K., Barnes R., Ruohoniemi J.M., Baker J., Talaat E.R., 2008, First radar measurements of ionospheric electric fields at sub-second temporal resolution, *Geophysical Research Letters*, 35 (3), DOI: 10.1029/2007GL032164
- Hosokawa K., Nishitani N., 2010, Plasma irregularities in the duskside subauroral ionosphere as observed with midlatitude SuperDARN radar in Hokkaido, *Radio Science*, 45 (4), DOI: 10.1029/2009RS004244
- Jones R.M., Stephenson J.J., 1975, A versatile three-dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere, U.S. Department of Commerce, OT Report, 75-76, 185 s.
- de Larquier S., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Ravindran Varrier N., Lester M., 2011, First observations of the midlatitude evening anomaly using Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) radars, *Journal of Geophysical Research*, 116 (A10), DOI: 10.1029/2011JA016787
- Lester M., 2008, SuperDARN: An example of a network approach to geospace science in the twenty-first century, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70 (18), 2309-2323, DOI: 10.1016/j.jastp.2008.08.003
- Lester M., 2013, The Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): An overview of its development and science, *Advances in Polar Science*, 24 (1), 1-11, DOI: 10.3724/SP.J.1085.2013.00001
- McWilliams K., Andre D., Greenwald R., Schiffler A., Sofko G., Yeoman T., 2003, SuperDARN pulse sequences – optimization and testing, SuperDARN Workshop, maj, Finlandia
- Nishitani N., Ogawa T., 2005, Model calculations of possible ionospheric backscatter echo area for a mid-latitude HF radar, *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, 19, 55-62
- Ogawa T., Hirasawa T., Ejiri M., Sato N., Yamagishi H., Fuji R., Igarashi K., 1990, HF radar experiment at Syowa Station for the study of high-latitude ionosphere-2: A capability (extended abstract), *Proceedings of the NIPR Symposium on Upper Atmosphere Physics*, 3, 91-95
- Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Clausen L.B.N., Greenwald R.A., Lester M., 2012, A survey of plasma irregularities as seen by the midlatitude Blackstone SuperDARN radar, *Journal of Geophysical Research*, 117 (A2), DOI: 10.1029/2011JA017207

- Sterne K.T., 2010, Testing the re-designed SuperDARN HF radar and modeling of a twin terminated folded dipole array, MSc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, dostępne online https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/32239/Sterne_KT_T_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y (09.08.2019)
- Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Mandea M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Tøffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T., 2015, International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth, Planets and Space*, 67, DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9
- Wu C.-C., Liou K., Lepping R.P., Hutting L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D., 2016, The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: "The St. Patrick's day event (17 March 2015)", *Earth, Planets and Space*, 68, DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y
- Yukimatu A.S., Tsutsumi M., 2002, A new SuperDARN meteor wind measurement: Raw time series analysis method and its application to mesopause region dynamics, *Geophysical Research Letters*, 29 (20), DOI: 10.1029/2002GL015210

S t r e s z c z e n i e

Radary SuperDARN powstały jako narzędzie do badań górnych warstw atmosfery i ich związków z magnetosferą i wiatrem słonecznym (Greenwald i in. 1995; Chisham i in. 2007; Lester 2008, 2013). Pracują w zakresie częstotliwości HF, pomiędzy 8 a 20 MHz. Ich zasada działania opiera się na wykorzystaniu rozpraszania Bragga na periodycznych strukturach przestrzennych o skalach odległości porównywalnych z długością fali sondującej. Radary te umożliwiają obserwacje formacji jonosferycznych zorientowanych wzdłuż linii pola geomagnetycznego. W artykule opisano podstawowe bloki funkcjonalne przykładowego radaru SuperDARN: tor nadawczy, odbiorczy oraz system antenowy. Omówiony został sposób modelowania wiązki sondującej.

Jedną z kluczowych kwestii przy wyborze lokalizacji dla nowopowstającej stacji SuperDARN jest określenie jej potencjalnych możliwości obserwacyjnych. Można wykorzystać do tego oprogramowanie dokonujące śledzenia dróg propagacji impulsu emitowanego przez radar i określania punktów, w których wektor fali jest prostopadły do lokalnego pola magnetycznego Ziemi. Warunek taki pozwoli na uzyskanie rozproszenia wyemitowanej przez antenę radaru fali z powrotem, w kierunku nadawania.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji dla hipotetycznej stacji SuperDARN, zlokalizowanej w południowo-zachodniej Polsce. W obliczeniach użyto programu do *ray tracingu*, bazującego na algorytmie Jones i Stephenson (1975) oraz modelu jonosfery IRI-2012.

Słowa kluczowe: International Reference Ionosphere, jonosfera, radar HF, rozpraszanie koherentne, ray tracing, SuperDARN.

S u m m a r y

SuperDARN radars were developed as a tool for testing the upper atmosphere regions and their coupling with the magnetosphere and solar wind (Greenwald et al. 1995; Chisham et al. 2007; Lester 2008, 2013). They work in the HF frequency range, between 8 and 20MHz. Their principle of operation is based on the use of Bragg scattering on periodic spatial structures with scales of distance comparable to the length of the sounding wave. These radars allow observation of ionospheric formations oriented along the geomagnetic field lines.

The article describes basic functional SuperDARN radar blocks: transmitting path, receiving path, and the antenna system as well. The method of modeling the sounding beam is also presented.

One of the key issues when choosing a location for a new SuperDARN station is to determine its potential for observation. You can use a special software to track the propagation paths of the pulse emitted by the radar and determining points in which the wave vector is perpendicular to the local geomagnetic field. Such a condition will allow to obtain the scatter of the wave emitted by the radar antenna back into the direction of transmission.

The article presents simulation results for a hypothetical SuperDARN station, located in south-western Poland. The calculation were based on a ray tracing program based on the Jones and Stephenson algorithm (Jones, Stephenson 1975) and the IRI-2012 ionosphere model.

Key words: coherent scattering, HF radar, International Reference Ionosphere, ionosphere, ray tracing, SuperDARN.