



# Sprawozdanie z ćwiczenia 1.

Wykonał: Kamil Kalinowski

Asystent prowadzący: dr Błażej Nikiel-Wroczyński

Obserwacje radioastronomiczne i analiza uzyskanych danych doprowadziły do wyznaczenia fluktuacji szumu, czułości systemu antena-radiometr, temperatury antenowej i temperatury radiometru.

## I. Wstęp

Ćwiczenie składa się z dwóch części. Dane zostały zebrane za pomocą radioteleskopu RT-15 zlokalizowanego w Obserwatorium Astrofizycznym Uniwersytetu Jagiellońskiego 21 października 2021 roku. Zegar w komputerze sterującym spóźniał się o około 10 min. 360° odpowiada 4096 działkom resolwera.

W obu częściach stała czasowa wynosiła

$$\tau_{tel} = \frac{1}{3} \text{ s},$$

stała próbkowania wynosiła

$$\tau_{pc} = \frac{1}{2} \text{ s},$$

i offset przetwornika wynosił 2340.

Ponieważ  $\tau_{tel} < \tau_{pc}$ , dane ze wszystkich punktów pomiarowych są niezależne statystycznie.

## I. Część A

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie temperatury systemowej, czułości odbiornika radioteleskopu oraz wyznaczenie przelicznika z jednostek własnych przetwornika analogowo-cyfrowego na Kelwiny.

Dane zostały zebrane pomiędzy 20:56, a 21:36 czasu komputera sterującego. Nazwa pliku z danymi to 2010\_C1A.txt. Obserwacje zostały wykonane w paśmie  $B = 8,9 \text{ MHz}$ .

Treść powyższych akapitów wyczerpuje zawartość sekcji z uwagami z karty pomiarowej.

## II. Część B

Celem tej części ćwiczenia jest wyznaczenie temperatury antenowej, temperatury radiometru, obliczenie przesunięcia skali przetwornika analogowo-cyfrowego (offset) i współczynnika wzmocnienia układu.

Dane zostały zebrane pomiędzy 21:45, a 22:03 czasu komputera sterującego.

Deklinacja radioteleskopu na początku i końcu pomiaru wyniosły kolejno około

$$\delta_p = 50^\circ, \quad \delta_k = 40^\circ.$$

Deklinacja czaszy radioteleskopu początkowo wzrastała, następnie przekroczyła północny biegun niebieski zmieniając rektascencję o  $180^\circ$ , po czym zaczęła maleć. Odpowiadało to ruchu czaszy od okolic zenitu ku horyzontowi.

Nazwa pliku z danymi to 2010\_C1B.txt. Tłumienie toru wynosi 0.

Co więcej, zanotowano, że kalibracja gorąca została wykonana źle ze względu na wysycenie przetwornika.

## II. Dane

Włączenie i wyłączenie kalibracji nie jest natychmiastowe, a przede wszystkim proces ten zajmuje wielokrotność stałej czasowej. Z tego

powodu w czasie włączania i wyłączania kalibracji aparatura rejestrowała pośrednie wartości ADU. W obu częściach doświadczeniach przefiltrowano dane usuwając punkty pomiarowe z „przejściowymi” wartościami ADU.

Nie stwierdzono rejestracji periodycznego sygnału, który mógłby pochodzić z urządzeń będących na wyposażeniu pobliskiego portu lotniczego Kraków-Balice lub zmiennego sygnału wybijającego się ponad szum z innego źródła naziemnego, który należałoby odflitrować.

## I. Część A

Podczas rejestrowania odczytów początkowo rejestrowano sygnał tła, następnie sygnał z kalibracji gorąca, ponownie sygnał tła, kalibrację zimną i sygnał tła po raz trzeci.

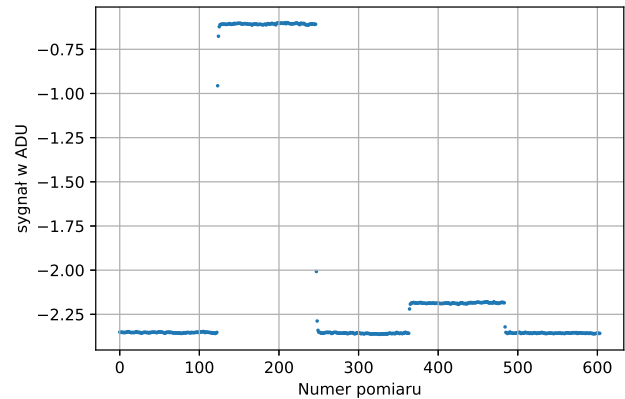
Wykres 1a zawiera wszystkie punkty pomiarowe, natomiast na wykresie 1b jest widoczny przefiltrowany o „przejściowe” punkty pomiarowe zestaw danych.

## II. Część B

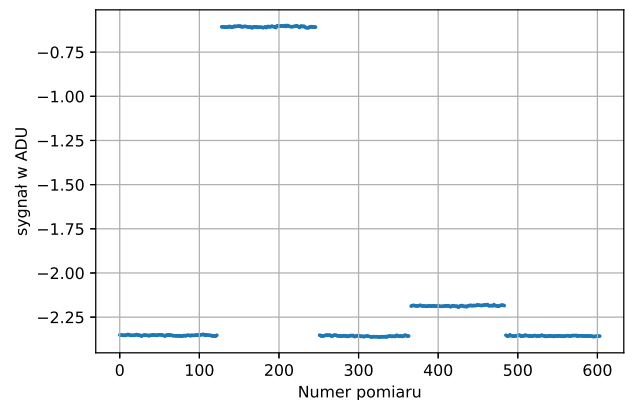
Podczas rejestrowania odczytów, gdy czasza radioteleskopu była skierowana ku zenitowi, przed rozpoczęciem ruchu czaszy wykonano kolejno kalibrację gorącą i kalibrację zimną. Gdy ruch się zakończył, ponownie wykonano kalibrację, lecz w odwrotnej kolejności: najpierw kalibrację zimną, a następnie kalibrację gorącą.

W procedurze filtracji danych usunięto wszystkie dane z drugiej kalibracji gorącej i następujące po niej ze względu na wysycenie przetwornika. Wykres 2a zawiera wszystkie punkty pomiarowe, natomiast na wykresie 2b jest widoczny przefiltrowany zestaw danych.

Pełnemu kątowi odpowiada  $q = 4096$  działek resolwera. Zdefiniowano współczynnik  $\chi$  jako stosunek pełnego kąta do  $q$ . Jego sens jest taki, że jedna działka resolwera odpowia-

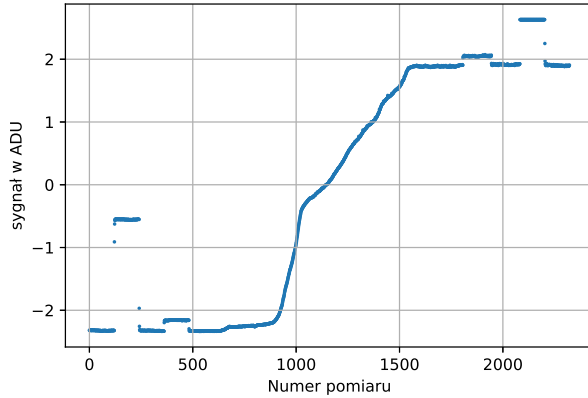


(a) Dane surowe

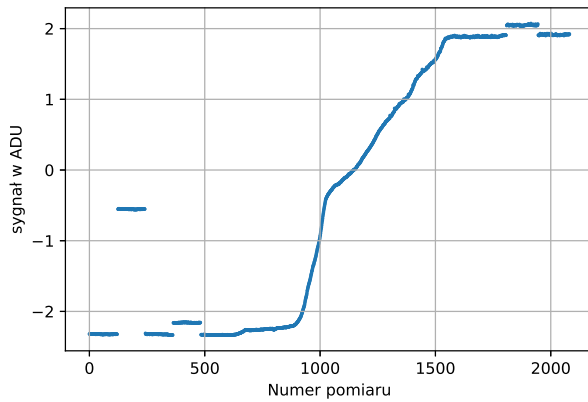


(b) Dane po przefiltrowaniu

Rysunek 1: Wykresy zawierające wykres sygnału w ADU w zależności od numeru pomiaru z części A



(a) Dane surowe



(b) Dane po przefiltrowaniu

Rysunek 2: Wykresy zawierające wykres sygnału w ADU w zależności od numeru pomiaru z części B

da kątowni  $\chi$ . Wynosi on

$$\chi = \frac{45}{512}^\circ.$$

Przeliczono działki resolwera na deklinację dla wszystkich punktów pomiarowych korzystając z prostego algorytmu.

Algorytm ten wyliczał kąt  $\delta'$  korzystając ze wzoru

$$\delta' = \delta_p + (x_i - x_p)\chi, \quad (1)$$

gdzie  $x_i$  jest  $i$ -tą wartością z resolwera, a  $x_p$  jest wartością z resolwera odpowiadającą kątowi  $\delta_p$ .

Następnie algorytm obliczał rzeczywistą wartość deklinacji  $\delta$ , zgodnie z regułą, że dla  $\delta' > 90^\circ$  wartość  $\delta$  wynosiła  $180^\circ - \delta'$ .

Kolejnym krokiem było przeliczenie deklinacji na wysokość nad horyzontem  $h$ . W tym celu wyznaczono kąty godzinne  $t$  dla wszystkich punktów korzystając z prostego algorytmu. Kąt godzinny  $t_1$  dla  $\delta' \leq 90^\circ$  wyznaczono ze wzoru

$$t_1 = y\chi, \quad (2)$$

gdzie  $y$  jest wartością w osi kąta godzinnego z resolwera (jest ona taka sama dla wszystkich punktów pomiarowych).

Dla  $\delta' > 90^\circ$  kąt godzinny  $t_2$  został obliczony wykorzystując wzór

$$t_2 = t_1 + 180^\circ. \quad (3)$$

Następnie wykorzystano wzór cosinusowy dla trójkąta paralaktycznego

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t, \quad (4)$$

gdzie  $\phi$  jest szerokością geograficzną radioteleskopu wynoszącą  $50^\circ 3' 13''$  i wyznaczono elewację we współrzędnych horyzontalnych  $h$  dla wszystkich punktów pomiarowych.

### III. Wielkości wyznaczane

Wzór wynikający z prawa propagacji niepewności ma postać

$$u_f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2}, \quad (5)$$

gdzie  $u_f$  jest wyznaczaną niepewnością standardową wartości danej funkcją  $f$  zależnej od  $N$  argumentów  $x_i$  o niepewnościach  $u_{x_i}$ .

Wzór na średnią wartość wielkości  $a$  ma postać

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{N}, \quad (6)$$

gdzie  $a_i$  jest  $i$ -tą wartością, a  $N$  liczbą wartości.

Wzór na odchylenie standardowe wartości średniej  $u_a$  ma postać

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}. \quad (7)$$

### I. Część A

Obliczono średni poziom sygnału dla kalibracji gorąca  $S_H$  i kalibracji zimna  $S_C$  wraz z odchyleniami standardowymi  $u_{S_H}$  i  $u_{S_C}$  obliczonymi ze wzoru (7):

$$S_H = (-0,60615 \pm 0,00013) \text{ ADU},$$

$$S_C = (-2,1859 \pm 0,00012) \text{ ADU}.$$

Zdefiniowano przelicznik  $\xi$  z  $S$  na temperaturę jako stosunek różnicy temperatur kalibracji gorąca i zimna oraz różnicy odpowiadającym im wartości  $S$ :

$$\xi \equiv \frac{T_H - T_C}{S_H - S_C}. \quad (8)$$

Przy założeniu, że liczba zliczeń ADU jest liniowo zależna od temperatury, może on posłużyć do przeliczania jednych jednostek na drugie.

Wzór na błąd tego przelicznika wyznaczono podstawiając powyższy wzór do wzoru (5) i, uwzględniając że  $u_{T_C}$ ,  $u_{T_H} = 0$ , otrzymano

$$u_\xi = \frac{T_C - T_H}{(S_C - S_H)^2} \sqrt{u_{S_C}^2 + u_{S_H}^2}. \quad (9)$$

Źródło szumowe to HP 346B i posiada ono temperaturę  $T_{\text{HP346B}} = 8670 \text{ K}$ . Sygnał kalibracji gorąca został zrealizowany poprzez tłumienie 20dB, miał zatem temperaturę  $T_H = 10^{-2} \cdot T_{\text{HP346B}} = 86,70 \text{ K}$ , natomiast sygnał kalibracji zimna powstał w wyniku przyłączenia dodatkowego tłumienia i miał temperaturę  $T_C = 9.81 \text{ K}$ .

Po podstawieniu danych do wzorów (8) i (9) otrzymano wynik

$$\xi = (48,672 \pm 0,041) \frac{\text{K}}{\text{ADU}}.$$

Wyznaczono także odchylenie standardowe sygnału tła ze wzoru (7)

$$u_{S_B} = 0,00013 \text{ ADU}.$$

Wykorzystano do tego celu wszystkie dane z pomiarów tła.

Aby przeliczyć  $\xi$  na minimalną, wykrywalną zmianę temperatury szumowej  $\Delta T_{\text{SYS}}$  posłużono się wzorem

$$\Delta T_{\text{SYS}} = \xi u_{S_B}, \quad (10)$$

z niepewnością wyznaczoną ze wzoru (5)

$$u_{\Delta T_{\text{SYS}}} = \sqrt{(u_{S_B} u_\xi)^2 + (\xi u_{u_{S_B}})^2}, \quad (11)$$

gdzie przyjęto  $u_{u_{S_B}} = 0$  (choć istnieją metody wyznaczenia niepewności standardowej dla niepewności standardowej).

Otrzymano wynik

$$\Delta T_{\text{SYS}} = (0,006327 \pm 5,4 \cdot 10^{-6}) \text{ K}.$$

Korzystając ze wzoru

$$\Delta T_{\text{SYS}} = \frac{T_{\text{SYS}}}{\sqrt{n B \tau_{\text{tel}}}}, \quad (12)$$

gdzie  $n$  jest liczbą pomiarów (punktów pomiarowych), wyznaczono wyrażenie pozwalające na obliczenie temperatury systemowej

$$T_{SYS} = \Delta T_{SYS} \sqrt{n B \tau_{tel}}, \quad (13)$$

oraz jej niepewności standardowej (korzystając z wzoru (5) i przyjmując niepewności inne niż  $u_{\Delta T_{SYS}}$  za 0)

$$u_{T_{SYS}} = u_{\Delta T_{SYS}} \sqrt{n B \tau_{tel}}. \quad (14)$$

Podstawiając  $n = 592$  i pozostałe dane, otrzymano wynik dla temperatury systemowej w zenicie bez sygnału kalibracyjnego

$$T_{SYS.z} = (265,17 \pm 0,23) \text{ K}.$$

## II. Część B

Moc  $W$  na wyjściu układu antena-radiometr (odczytaną przez przetwornik analogowo-cyfrowy) można wyrazić wzorem

$$W = k_B G(T_{sys}) + x, \quad (15)$$

gdzie  $k_B$  jest stałą Boltzmanna,  $G$  jest wzmocnieniem układu, natomiast  $x$  to przesunięcie skali przetwornika analogowo-cyfrowego. Korzystając z tego równania utworzono układ równań

$$\begin{cases} W_h = k_B G(T_h + T_R) + x \\ W_z = k_B G(T_z + T_R) + x \\ W_{z.cal.H} = k_B G(T_z + T_R + T_{cal.H}) + x \\ W_{z.cal.C} = k_B G(T_z + T_R + T_{cal.C}) + x \\ W_{h.cal.C} = k_B G(T_h + T_R + T_{cal.C}) + x \\ T_z + T_R = T_{SYS.z} \end{cases} \quad (16)$$

Równania odpowiadają kolejno:

1. czaszy skierowanej na horyzont,
2. czaszy skierowanej na zenit,
3. czaszy skierowanej na zenit z włączoną kalibracją gorącą,

4. czaszy skierowanej na zenit z włączoną kalibracją zimną,
5. czaszy skierowanej na horyzont z włączoną kalibracją zimną.

Wyznaczono średnie wartości  $W_h$ ,  $W_z$ ,  $W_{z.cal.H}$ ,  $W_{z.cal.C}$  i  $W_{h.cal.C}$  wykorzystując dane z pomiarów i wzór (6) oraz ich odchylenia standardowe wykorzystując wzór (7). W celu wyznaczenia  $W_h$  wykorzystano punkty pomiarowe o numerach porządkowych od 1600 do 1750, natomiast w celu wyznaczenia  $W_z$  wykorzystano punkty pomiarowe o numerach porządkowych od 250 do 350. Otrzymano wartości

$$W_h = (1,88503 \pm 0,00054) \text{ ADU},$$

$$W_z = (-2,32520 \pm 0,00039) \text{ ADU},$$

$$W_{z.cal.H} = (-0,55369 \pm 0,00014) \text{ ADU},$$

$$W_{z.cal.C} = (-2,159194 \pm 0,00013) \text{ ADU},$$

$$W_{h.cal.C} = (2,04809 \pm 0,00016) \text{ ADU}.$$

Utworzono układ z pierwszych trzech równań z układu (16) i rozwiązano go względem niewiadomych

$$T_z = T_h + \frac{T_{cal.H}(W_z - W_h)}{W_{z.cal.H} - W_z}, \quad (17)$$

$$G_1 = \frac{W_{z.cal.H} - W_z}{k_B T_{cal.H}}, \quad (18)$$

$$x_1 = W_h - \frac{(T_h + T_R)(W_{z.cal.H} - W_z)}{T_{cal.H}}. \quad (19)$$

Z kolejnych dwóch równań również utworzono układ, z którego ponownie wyznaczono parametry  $x$  i  $G$ :

$$G_2 = \frac{W_{h.cal.C} - W_{z.cal.C}}{k_B(T_h - T_z)}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} x_2 = & (-T_z W_{h.cal.C} + T_h W_{z.cal.C} \\ & + T_{cal.C}(-W_{h.cal.C} + W_{z.cal.C}) \\ & + T_R(-W_{h.cal.C} + W_{z.cal.C})) / (T_h - T_z). \end{aligned} \quad (21)$$

W równaniach (19) i (21) występuje  $T_R$ , które jest kolejną niewiadomą. Można ją jednak teraz wyznaczyć wykorzystując ostatnie równanie z układu równań (16) oraz wzór (17):

$$T_R = T_{SYS,z} - T_z. \quad (22)$$

Ze wzoru (5) wyznaczono niepewności standardowe wartości  $T_z$ ,  $G_i$ ,  $x_i$ , i  $T_R$ . Wyrażenia na te niepewności są zawarte w pliku wzory.nb dołączonym do sprawozdania, poza  $u_{T_R}$ , które ma postać

$$u_{T_R} = \sqrt{u_{T_{SYS,z}}^2 + u_{T_z}^2}. \quad (23)$$

Po podstawieniu danych otrzymano wartości

$$T_z = (83,946 \pm 0,041) \text{ K},$$

$$G_1 = (0,014800 \pm 3,5 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{ADU}}{\text{J}},$$

$$G_2 = (0,0147890 \pm 3,1 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{ADU}}{\text{J}},$$

$$T_R = (181,22 \pm 0,23) \text{ K},$$

$$x_1 = (-7,7433 \pm 0,0053) \text{ ADU},$$

$$x_2 = (-7,7738 \pm 0,0052) \text{ ADU}.$$

Obliczono średnie wartości  $G_i$  i  $x_i$  ze wzoru (6), a ich odchylenia standardowe wzięto ze wzoru (7) jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności odpowiednio  $G_i$  i  $x_i$ :

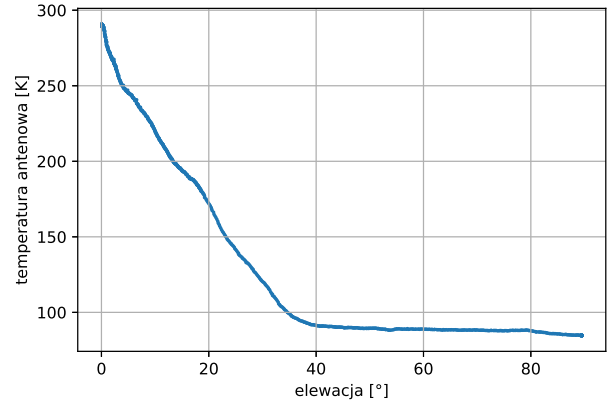
$$\bar{x} = (7,7586 \pm 0,0037) \text{ ADU},$$

$$\bar{G} = (0,0147945 \pm 2,4 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{ADU}}{\text{J}}.$$

Następnie przeliczono wartości sygnału w  $\text{ADU}$  na Kelwiny zgodnie ze wzorem

$$T_i = \xi(W_i - W_h) + T_h. \quad (24)$$

Wykres 3 przedstawia zależność  $T_A(h)$ .



Rysunek 3: Zależność  $T_A(h)$

## IV. Dyskusja

Jakość danych w obu przypadkach była dobra w takim sensie, że nie zarejestrowano sygnału, który wymagałby użycia filtra do jego usunięcia.

Wyznaczona wartość  $T_R$  nie sugeruje problemu z danymi. Radiometr jest typowo urządzeniem chłodzonym do temperatur kriogenicznych w celu minimalizacji szumu, zatem nie dziwi temperatura znacznie mniejsza od temperatury otoczenia. Wyznaczenie tej wartości było zależne tylko od  $T_{SYS,z}$ , a co za tym idzie, również ta wartość nie budzi zastrzeżeń związanych z potencjalnymi błędami.

### I. Część A

Niepewności standardowe średnich z pomiaru sygnału z włączoną i z wyłączoną kalibracją są niemal identyczne. Oznacza to, że sygnał ze źródła szumowego jest bliski niezmiennemu, co może oznaczać, że jest to urządzenie dobrej jakości.

### II. Część B

Wartości  $x_i$  są ze sobą zgodne dopiero w zakresie  $6\sigma$ .

Również parametry  $G_i$  są ze sobą niezgodne



w zakresie  $1\sigma$ , a zgodne są ze sobą dopiero w zakresie  $4\sigma$ .

Sugeruje to, że parametry te nie były stałe w trakcie trwania pomiarów i warto przeprowadzać kalibrację więcej niż raz w trakcie pomiarów.

Podczas pomiarów z tej części odchylenia średnich z sygnału z kalibracji w zenicie i horyzoncie są znacznie mniejsze od odchylenia sygnału bez włączonego źródła szumowego. Nie potrafię wyjaśnić tej rozbieżności względem pomiarów z części A.

Odchylenia z horyzontu są zauważalnie większe dla sygnału z czaszy przy horyzoncie, względem tych dla danych z zenitu, zarówno dla sygnału z włączoną kalibracją zimną, jak i bez kalibracji. Większe odchylenie standardowe może oznaczać rejestrowanie zmiennego sygnału pochodzącego z urządzeń naziemnych przy horyzoncie.

Wzrost temperatury antenowej wraz ze spadkiem elewacji anteny można wyjaśnić rejestracją promieniowania emitowanego przez urządzenia naziemne, w falach krótkich, na które czuły jest radioteleskop. Fale o tej długości mogą propagować przy powierzchni i mają zasięg od kilku do kilkudziesięciu kilometrów. Jest to dość krótki zasięg względem zasięgu np. fal średnich i długich, ale w takiej odległości od radioteleskopu i tak znajduje się bardzo dużo sztucznych źródeł ze względu na lokalizację obserwatorium w obrębie Krakowa.

Niezerowa temperatura antenowa w zenicie może świadczyć o rejestracji promieniowania emitowanego przez źródła naturalne z kosmosu, jak gwiazdy i radiogalaktyki (byłby to bardzo słaby efekt), oraz sztucznych satelit, ale także (a może przede wszystkim) jonosferycznych fal krótkich.

Pasma, w którym czuły jest teleskop mieści się w zakresie fal radiowych krótkich.

Odbijanie fal krótkich przez wyższe, naładowane elektrycznie warstwy atmosfery tak, aby, przepuszczane przez jonosferę (jeśli pozwala

na to pogoda kosmiczna), z powrotem wracały na Ziemię, jest głównym sposobem propagacji tego rodzaju fal radiowych wykorzystywanym w komunikacji ze względu na znaczne zwiększenie zasięgu takich fal. Zasięg fal krótkich jonosferycznych wzrasta do kilkuset kilometrów względem fal krótkich propagowanych powierzchniowo.

Fale krótkie propagują jonosferycznie, jeśli zostaną wyemitowane pod dużym kątem ( $70^\circ$ - $90^\circ$ ) względem powierzchni Ziemi, co sprzyja hipotezie zarejestrowaniu ich w zenicie.

Zweryfikować hipotezę o znacznym udziale krótkich fal jonosferycznych w sygnale z zenitu można przeprowadzając taki sam pomiar w dzień, ponieważ w nocy lepiej odbijane od górnej atmosfery są fale o częstotliwościach zbliżonych do tych, na które czuły jest radioteleskop, natomiast w dzień są to fale dłuższe. Zatem jeśli temperatura antenowa w dzień byłaby mniejsza niż w nocy, byłby to argument za tą hipotezą.

### Załączniki

1. Karta\_pomiarów\_1A.pdf – Wypełniona i podpisana przez asystenta karta pomiarów z części A
2. Karta\_pomiarów\_1B.pdf – Wypełniona i podpisana przez asystenta karta pomiarów z części B
3. wzory.nb – dokument zawierający wyznaczone i wykorzystane w sprawozdaniu wyrażenia na niepewności standardowe wielkości  $T_z$ ,  $G_i$  i  $x_i$ .

Data złożenia sprawozdania	Proponowana ocena	Data złożenia poprawy	Końcowa ocena