



Obserwatorium Astronomiczne UJ

Zakład Fizyki Wysokich Energii

Akademia Górniczo-Hutnicza

Katedra Elektroniki

Andrzej Kułak

Stulecie badań pól elektromagnetycznych ELF

Dwerniczek - 2008

(w niewielkim stopniu zmieniona wersja wykładu wygłoszonego w Warszawie
21 listopada 2007 na konferencji Stowarzyszenia Elektryków Polskich)

ELF

fale elektromagnetyczne ekstremalnie niskiej częstotliwości

częstotliwości: 3 - 3000 Hz

długości fal: 100 000 - 100 km

Extremely Low Frequency - ELF: 3 ÷ 3000 Hz

metody detekcji:

krótkie dipolowe anteny elektryczne i magnetyczne

szerokopasmowe układy odbiorcze

metody generacji:

źródła naturalne - atmosfery, jonosfery i magnetosfery planet

sztuczne - nadajniki + anteny + sterowanie procesami geofizycznymi

Współczesne działy badań w zakresie ELF

badania pół naturalnych ELF i ich źródeł

badania propagacji fal ELF w falowodzie Ziemia - jonosfera

radiokomunikacja

generacji fal ELF poprzez sterowanie procesami geofizycznymi

monitoring elektromagnetyczny planety

Ważniejsze daty w historii badań ELF

- 1890 - A. N. Kenelly, T. A. Edison - nieudana próba detekcji emisji Słońca
- 1952 - W. O. Schumann - rozwiązania równań pola dla wnętrza Ziemia - jonosfera
- 1957 - odkrycia pól rezonansowych generowanych we wnętrzu magnetosferycznej
- 1960 - M. Balser, C. A. Wagner - pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna
- 1962 - 65 - modele wnętrza tłumionej
- 1965 - 1975 - badania nad propagacją w falowodzie Ziemia - jonosfera
- 1976 - S. V. Polyakov - teoria rezonansu fal Alfvena w jonosferze
- 1979 - powstanie systemu radiowej łączności globalnej
- 1989 - P. P. Belyaev - pierwsza obserwacja rezonansu fal Alfvena w jonosferze
- 1991 - E. R. Williams - zastosowanie rezonansu Schumanna do badań klimatycznych
- 1999 - początek badań wpływu „pogody kosmicznej” na stan rezonansu Schumanna
- 2005 - globalny monitoring aktywności elektromagnetycznej planety

A. N. Kenelly - idea pierwszego eksperymentu ELF - 1890

założenia:

istnieją fale elektromagnetyczne - H. Hertz - 1887

Słońce promieniuje fale elektromagnetyczne w szerokim zakresie

Słońce promieniuje fale elektromagnetyczne w zakresie ELF

obserwacja w zakresie ELF jest wykonalna technicznie

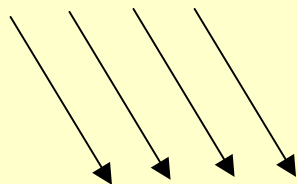
uczestnicy projektu:

A. K. Kenelly - twórca hipotezy o istnieniu jonosfery ziemskiej

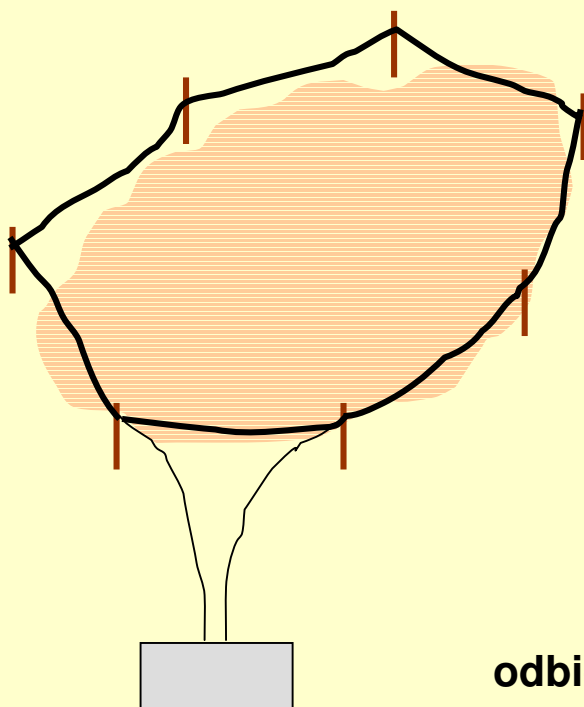
T. A. Edison - sprzęt laboratoryjny, finansowanie badań

E. S. Holden - konsultacja astronomiczna (obserwatorium Licka)

A. N. Kenelly, T. A. Edison - konstrukcja radioteleskopu ELF - 1890



emisja pola elektromagnetycznego ELF ze Słońca



7 zwojowa antena ferrytowa

złożę rudy żelaza w New Jersey

odbiornik ELF - słuchawka telefoniczna

A. N. Kenelly, T. A. Edison - przyczyny porażki - 1890

wokół Ziemi istnieje jonosfera zasłaniająca Słońce (Kenelly - odkrycie 1901)

odbiornik zbyt mało czuły by rejestrować świsty (VLF - odkrycie 1953)

dygresja:

próbę wysokoczęstotliwościową (VHF) odbioru promieniowania Słońca podjął

w 1894 r. O. Lodge

zestaw odbiorczy: antena pętlowa Hertza + koherer

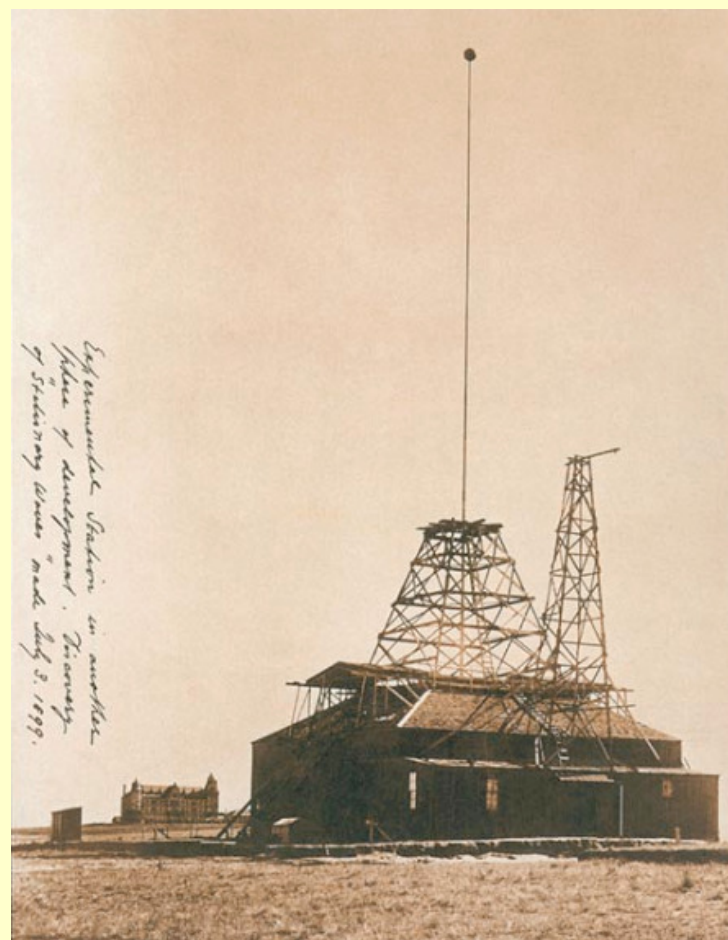
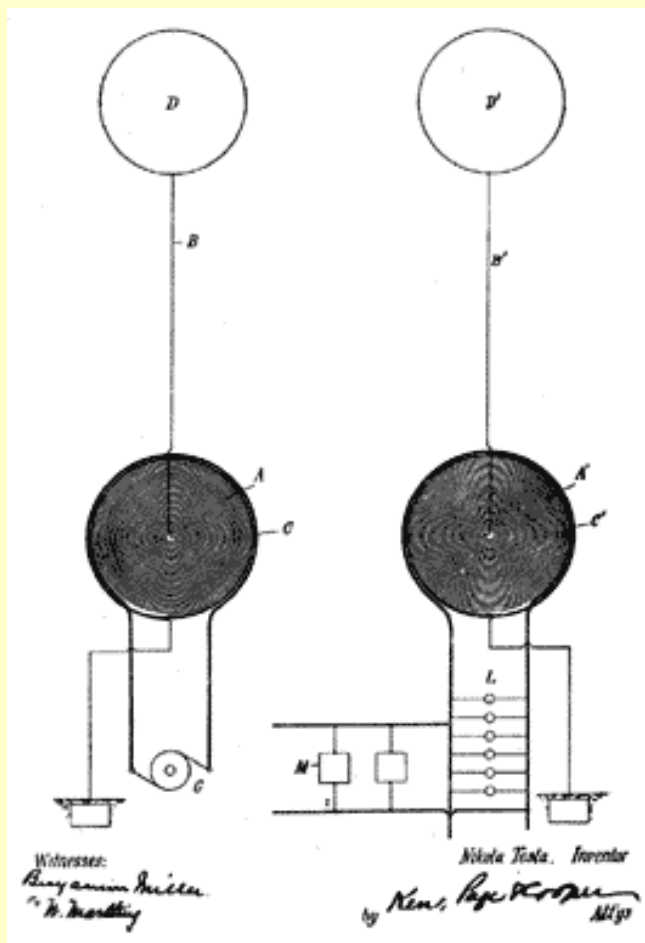
wynik: negatywny - zbyt mała czułość urządzenia (pierwsza rejestracja - 1944)

N. Tesla - pierwsza transmisja w zakresie ELF - 1899

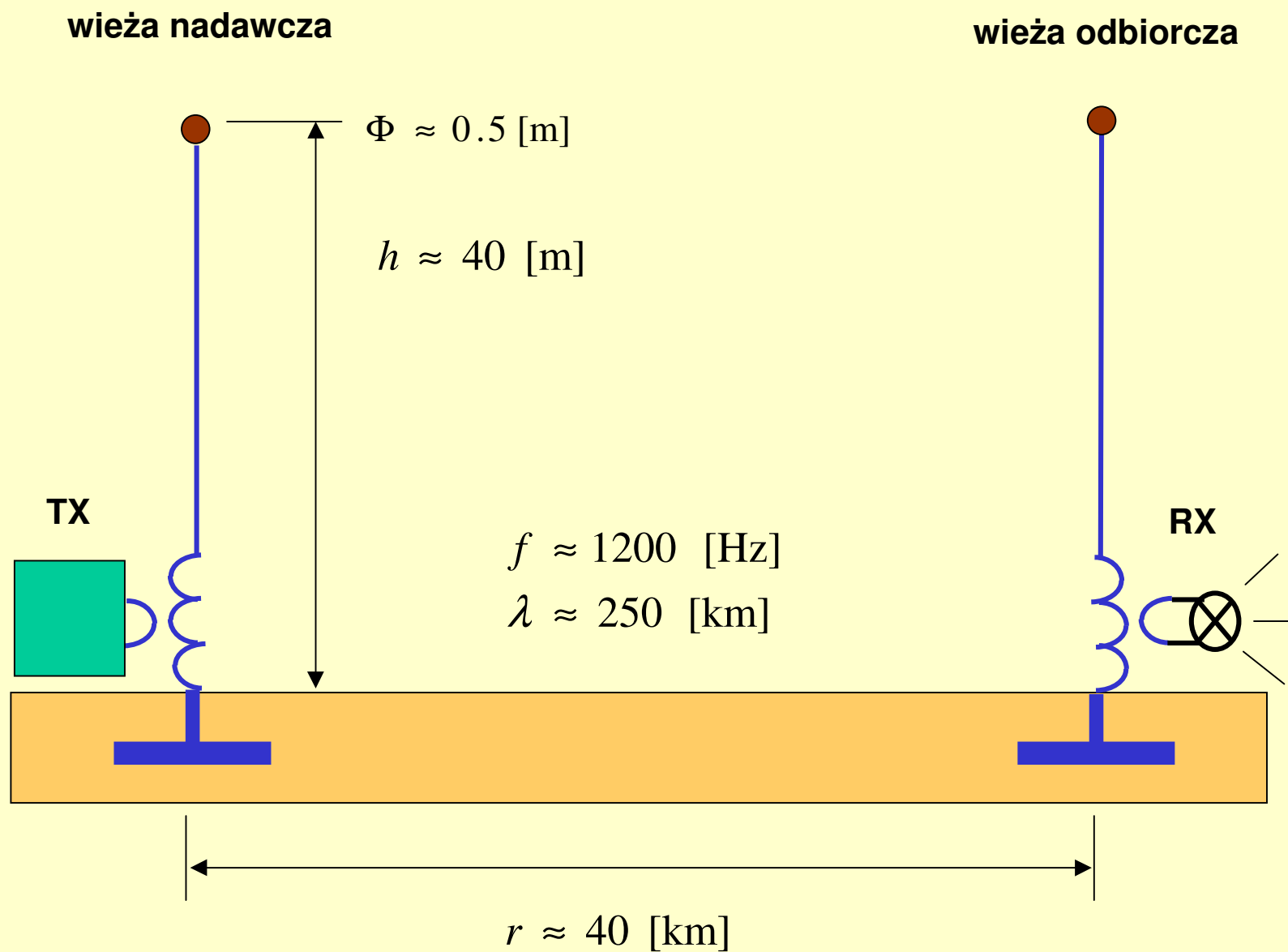
łączność ELF na antenach krótkich

1900 - US patent 650 343

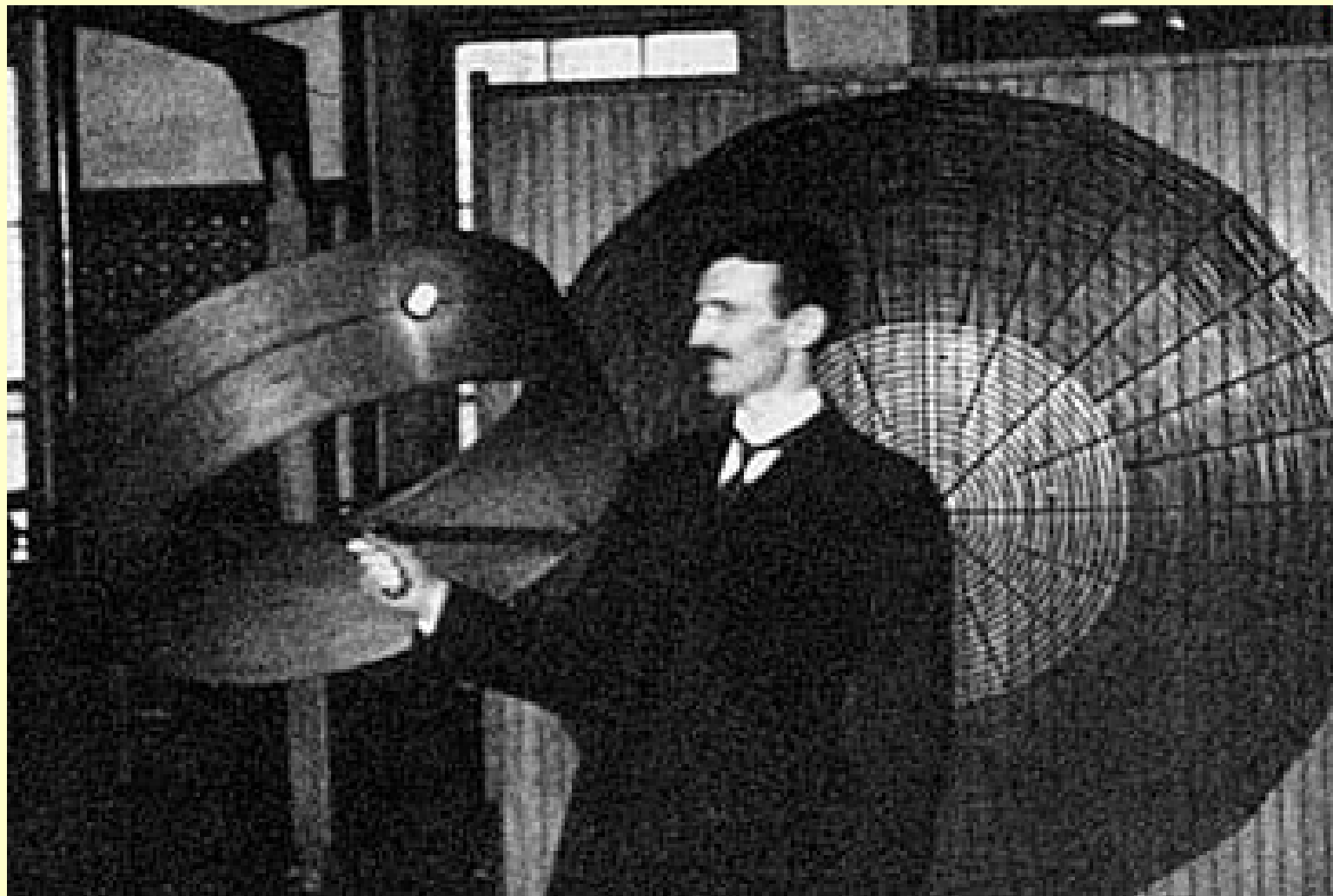
1905 - US patent 787 412



Pokaz przekazu energii w Colorado Springs - 1899



Układ strojeniowy anteny TX w Colorado Springs



Badania pól naturalnych ULF/ELF

1914 - 1952 - przerwa w badaniach pól ELF

1952 - W. O. Schumann - rozwiązania dla wnętrza Ziemia - jonosfera

1957 - odkrycia pól rezonansowych generowanych we wnętrzu magnetosferycznej

1960 - M. Balser, C. A. Wagner - pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna

1965 - T. Madden - model dwuwymiarowej propagacji w falowodzie Ziemia - jonosfera

1965 - 1975 - badania nad propagacją w falowodzie Ziemia - jonosfera

1976 - S. V. Polyakov - teoria rezonansu fal Alfvena w jonosferze

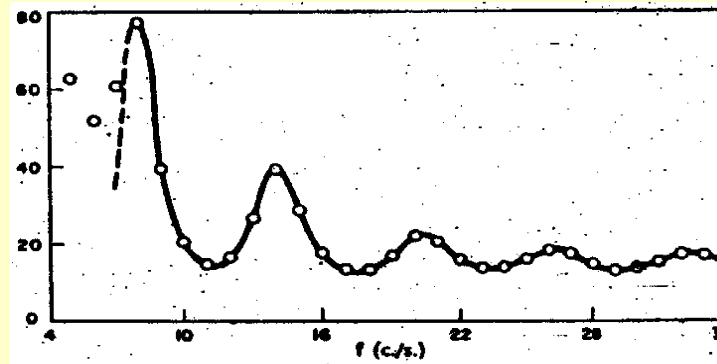
1989 - P. P. Belyaev - pierwsza obserwacja rezonansu fal Alfvena w jonosferze

1991 - E. R. Williams - zastosowanie rezonansu Schumanna do badań klimatycznych

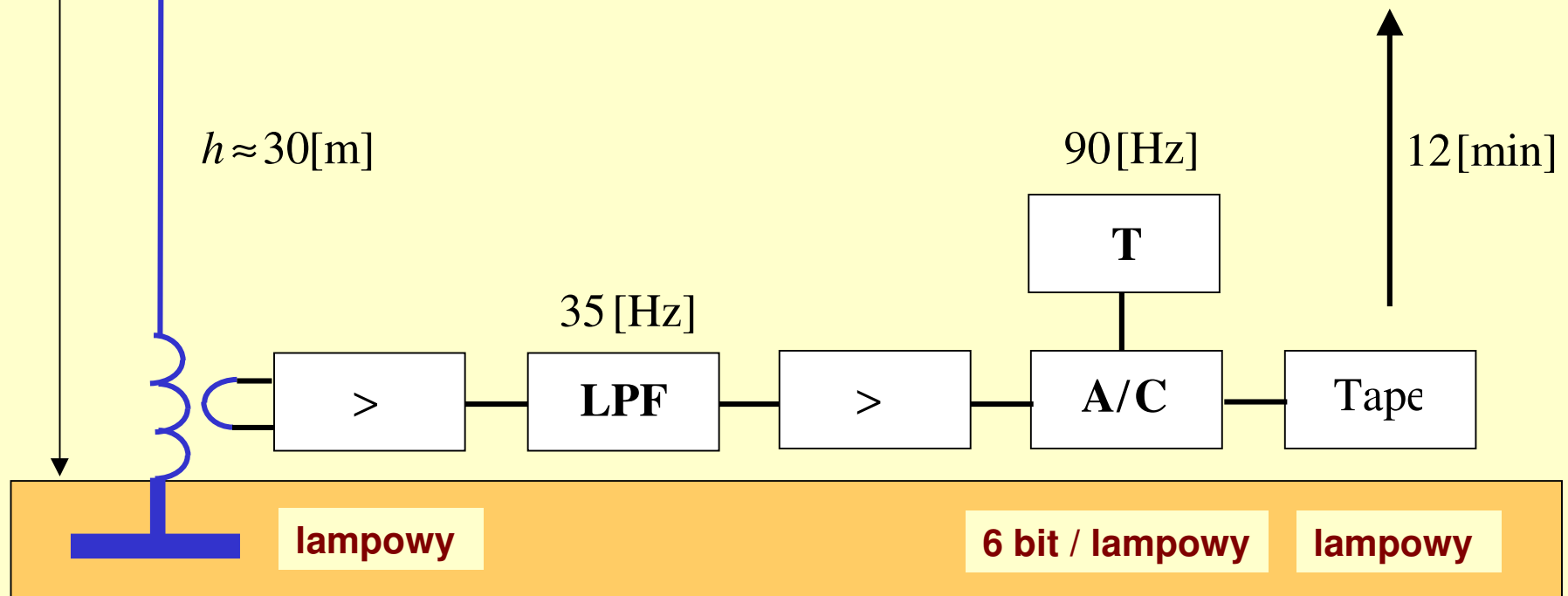
1999 - OA UJ - ustalenie wpływu cyklu aktywności Słońca na rezonans Schumanna

1960 - M. Balser, C. A. Wagner - pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna

Nature, 188, 638, 1960



IBM 709



Ważniejsze etapy w historii badań rezonansu Schumanna

1952 - W. O. Schumann - rozwiązania równań pola we wnętrzu Ziemi - jonosfera

1957 - odkrycia pól naturalnych ULF generowanych w magnetosferze Ziemi

1960 - M. Balser, C. A. Wagner - pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna

- I etap badań - badania propagacji w falowodzie Ziemi - jonosfera

odkrycie Q - burstów

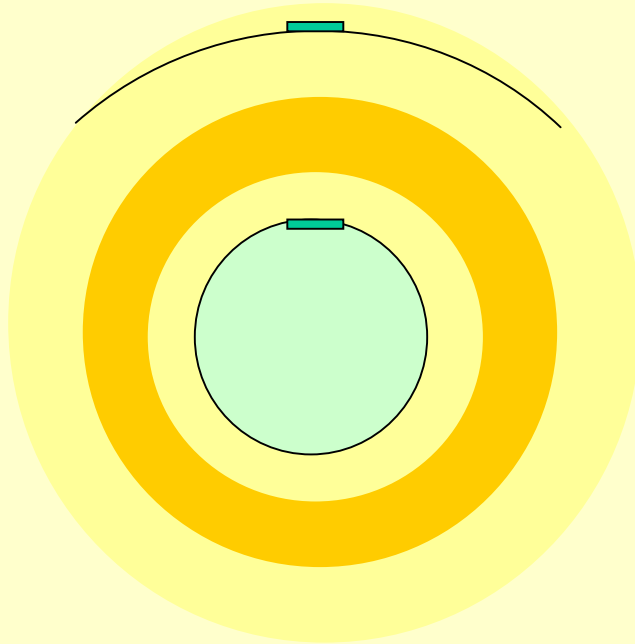
1979 - powstanie systemu radiokomunikacji globalnej ELF

nie jawny nurt badań

1991 - E. R. Williams - pierwsza praca aplikacyjna RS - badanie tropików

- II etap badań - badania geofizyczne, klimatyczne i kosmiczne

Współczesne obserwacje pól naturalnych w zakresie ELF



anten w przestrzeni kosmicznej (DEMETER)

stacje obserwacyjne na powierzchni Ziemi

Aso	$\varphi = 33^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 135^{\circ} \text{ E}$
Fairbanks	$\varphi = 63^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 150^{\circ} \text{ E}$
Kharkov	$\varphi = 50^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 37^{\circ} \text{ E}$
Tottori	$\varphi = 35^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 134^{\circ} \text{ E}$
Rhode Island	$\varphi = 47^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 71^{\circ} \text{ E}$
North Pole	$\varphi = 89^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 00^{\circ} \text{ E}$
Nagycenk	$\varphi = 47^{\circ} \text{ N}$	$\lambda = 17^{\circ} \text{ E}$
OA UJ	$\varphi = 49^{\circ} 20' \text{ N}$	$\lambda = 22^{\circ} 40' \text{ E}$

Co się bada ?

pomiar parametrów rezonatorów



można testować modele rezonatorów

parametry fizyczne ścian

wpływ czynników na ściany

detektor - typ I

pomiar źródeł w rezonatorach

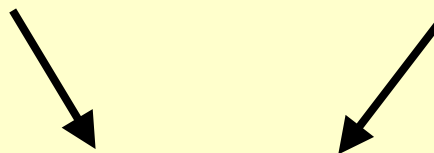


fizyka źródeł

modele źródeł

mapy aktywności

detektor - typ II



szeroki zakres informacji o atmosferze, jonosferze i stanie przestrzeni kosmicznej

monitoring planety

Rozwój radiokomunikacji w zakresie ELF

- 1893 - W. Preece - telegraf indukcyjny „bez drutu” - 8 km**
- 1899 - N. Tesla - udany eksperyment na dystansie 40 km**
- 1901 - G. Marconi - łączność przez Atlantyk - odkrycie jonosfery**
- 1905 - N. Tesla - patent na bezprzewodowe przesyłanie energii w zakresie ELF**
- 1938 - W. O. Schumann - idea łączności globalnej w zakresie ELF ?**
- 1952 - W. O. Schumann - rozwiązanie równań pola we wnętrzu Ziemia - Jonosfera**
- 1960 - M. Balser - obserwacja rezonansu Schumanna**
- 1960 - 1969 - badania propagacji fal ELF w falowodzie Ziemia - jonosfera**
- 1969 - pomysł budowy systemu radiokomunikacji w zakresie ELF**
- 1974 - realizacja projektu *Sangine* (IEEE 1974)**
- 1979 - start systemu *Seafarer* - 76 Hz**
- 1985 - inicjacja systemu *Zevs* - 82 Hz**

Radiokomunikacyjne parametry falowodu Ziemia - jonosfera

pole nie wnika głębiej niż do do warstw D i E (65 - 125 km)

wysokość warstw odbijających $< \lambda/2$ (aż do 1500 Hz)

propagacja falowodowa 1 modowa (dwuwymiarowa linia transmisyjna)

parametry propagacji zależne od częstotliwości (wpływ głębokości wnikania)

małe średnie współczynniki tłumienia: 0.3 dB/Mm - 10 Hz, 1.2 dB/Mm - 100 Hz

mała prędkość fazowa:	0.75 c	0.85 c
-----------------------	--------	--------

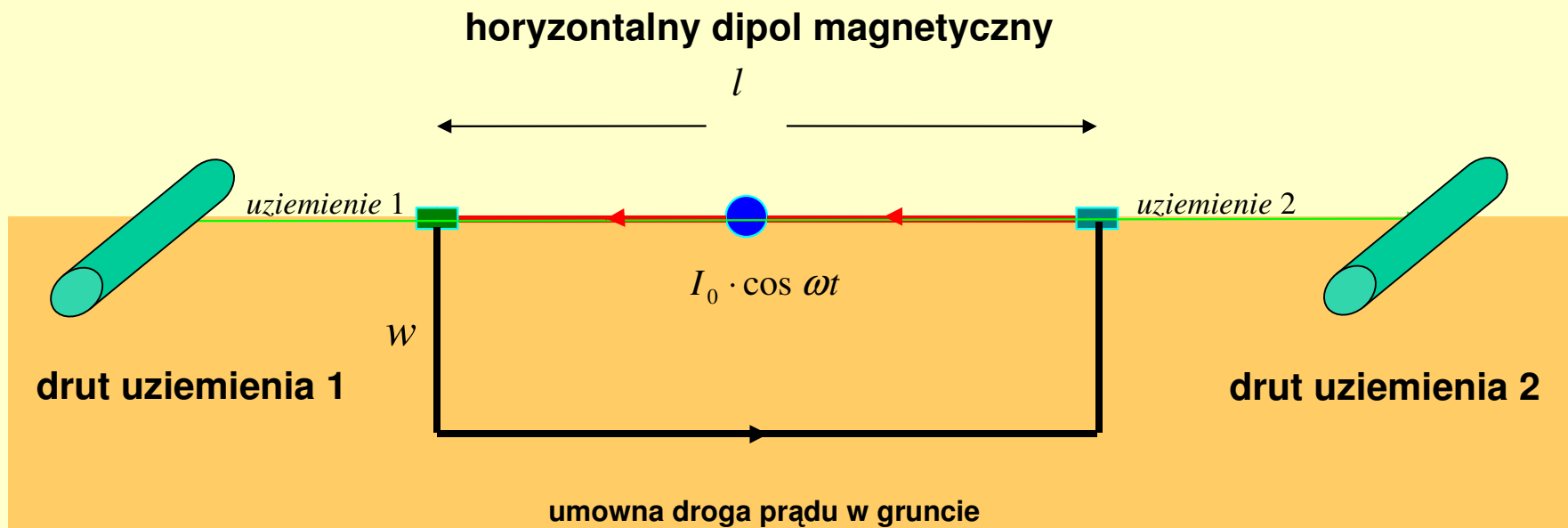
bardzo stałe warunki propagacji (zmiany dobowe tłumienia rzędu 1%)

mała różnica tłumienia pomiędzy trasą dzienną a nocną

mała zależność współczynnika tłumienia od szerokości geo (ale strefa zorzowa)

duża stałość propagacji w cyklu słonecznym (zmiany ok. 5 %)

Anteny nadawcze w zakresie ELF

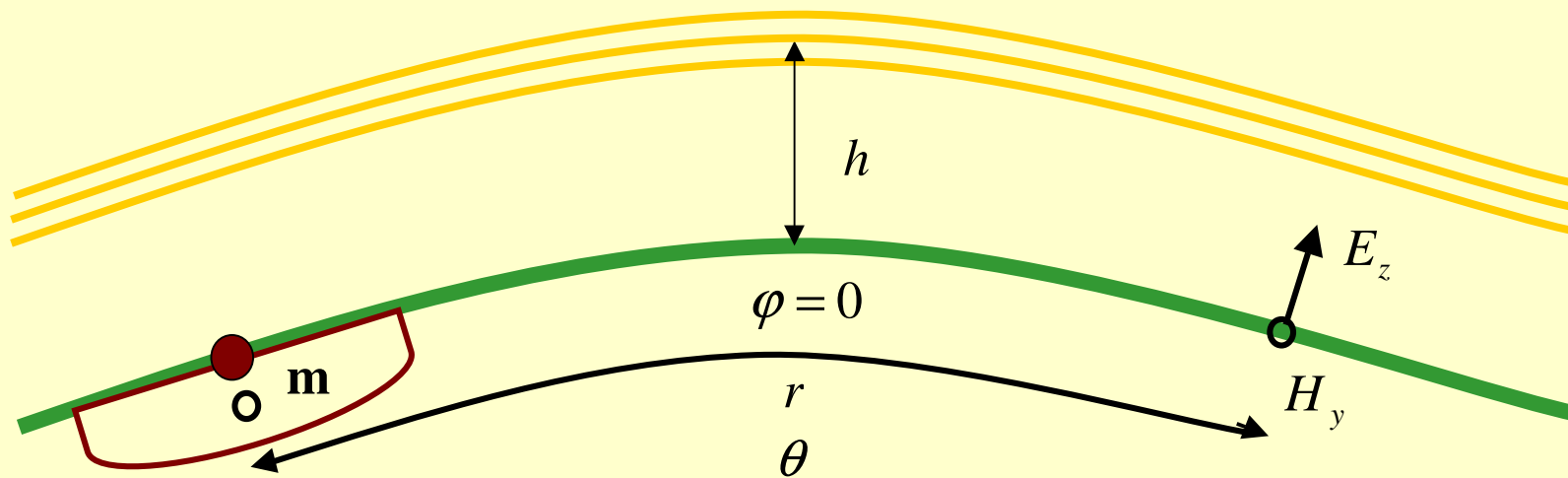


$$m = I_0 \cdot l \cdot w \quad \text{moment magnetyczny anteny}$$

$$w = \frac{\delta}{\sqrt{2}}$$

$$\delta \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad \text{głębokość wnikania pola do gruntu}$$

Propagacja ELF w falowodzie Ziemia - jonosfera



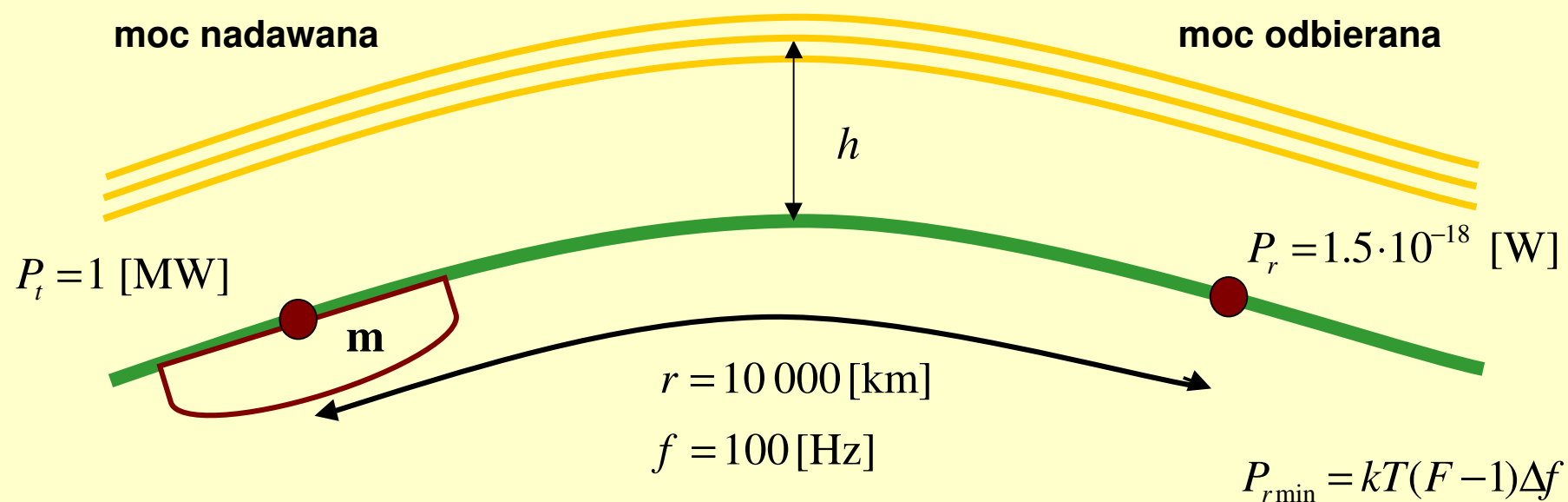
$$B(r) \propto \frac{m}{h} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot e^{-\alpha r}$$

faktor anteny

faktor rozpraszania

faktor strat energii

Bilans energetyczny łącza radiowego w zakresie ELF



sprawność anteny nadawczej

$$\eta_t \approx 5 \cdot 10^{-3}$$

sprawność falowodu

$$\eta_k \approx 7 \cdot 10^{-2}$$

sprawność anteny odbiorczej

$$\eta_r \approx 4 \cdot 10^{-21}$$

bilans energii

$$\frac{P_r}{P_t} = \eta_t \cdot \eta_k \cdot \eta_r \approx 1.5 \cdot 10^{-24}$$

238dB

$$\frac{S}{N} = 12.8 \text{ [dB]}$$

(obliczenia dla anteny magnetycznej $l = 3 \text{ m}$)

System łączności *Seafarer* - 76 Hz

dwa nadajniki: **WTF** (Wisconsin Transmitter Facility)

MTF (Michigan Transmitter Facility)

$$\sigma_g \approx 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ [S/m]}$$

$$w \approx 2.6 \text{ [km]}$$

$$l \approx 22.5 \text{ [km]}$$

$$I = 300 \text{ [A]}$$

$$\lambda = 3.95 \text{ [Mm]}$$

$$m \approx 2 \times 300 \text{ [A]} \times 22.5 \text{ [km]} \times 2.6 \text{ [km]} = 3.5 \cdot 10^{10} \text{ [A} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

$$\left. \begin{array}{ll} r = 10\,000 \text{ [km]} & \frac{S}{N} = 12.8 \text{ [dB]} \\ r = 20\,000 \text{ [km]} & \frac{S}{N} = 22.8 \text{ [dB]} \end{array} \right\}$$

parametry systemu

System Seafarer



[strona SEAFARER]

Dwerniczek - 2008

System łączności Zevs - 82 Hz

nadajnik: KPTH (półwysep Kola)

$$\sigma_g \approx 10^{-5} [\text{S/m}]$$

$$h_g \approx 10 [\text{km}]$$

$$\sigma_d \approx 10^{-3} [\text{S/m}]$$

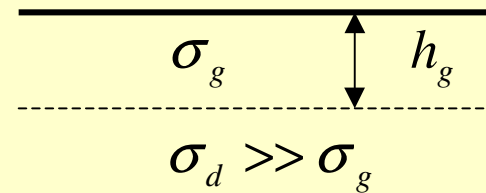
$$w \approx h_g \approx 10 [\text{km}]$$

$$l \approx 55 [\text{km}]$$

$$I = 200 [\text{A}]$$

$$\lambda = 3.65 [\text{Mm}]$$

warstwa podwójna



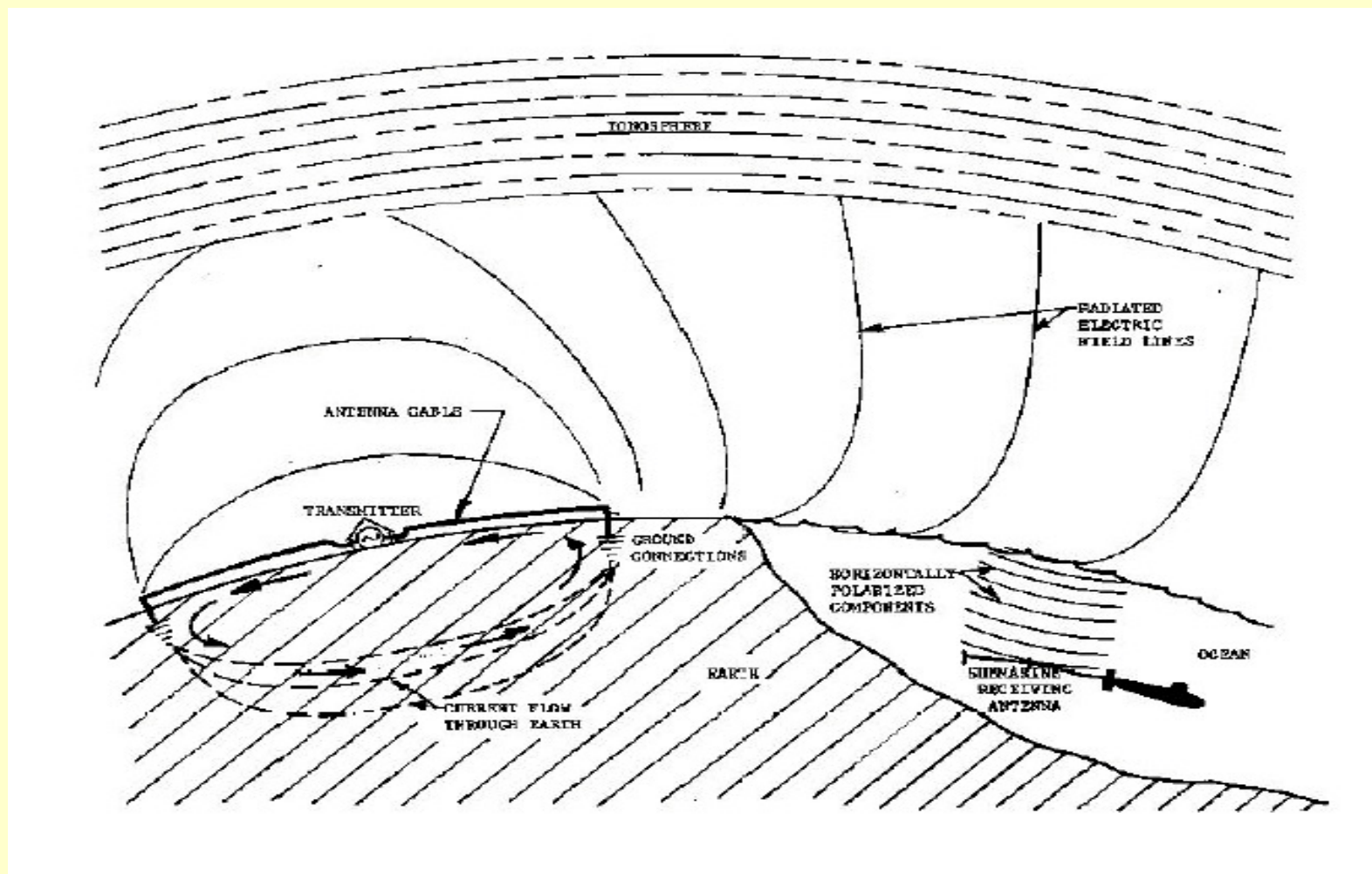
$$w \approx h_g$$

$$m \approx 200 [\text{A}] \times 55 [\text{km}] \times 10 [\text{km}] = 1.1 \cdot 10^{11} [\text{A} \cdot \text{m}^2]$$

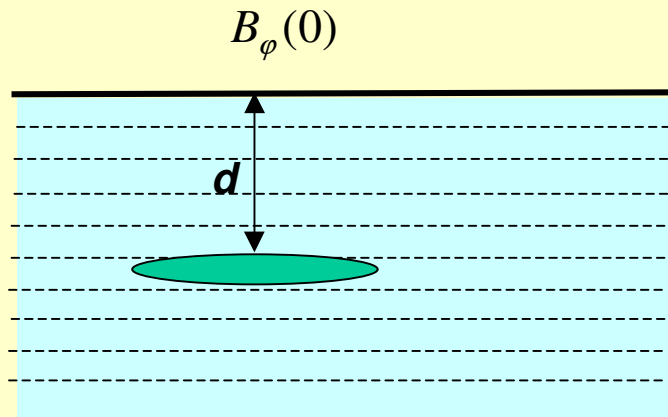
$$\left. \begin{array}{l} r = 10\,000 [\text{km}] \quad \frac{S}{N} = 22.3 [\text{dB}] \\ r = 20\,00 [\text{km}] \quad \frac{S}{N} = 31.6 [\text{dB}] \end{array} \right\}$$

parametry systemu

Łączność z obiektami podwodnymi w zakresie ELF



Praca systemów radiowych ELF pod wodą



ocean na 100 Hz

$$\sigma \approx 3 \text{ [S/m]}$$

$$\delta \approx 25 \text{ [m]}$$

$$T = -8.69 \cdot \frac{d}{\delta} \text{ [dB]}$$

pole osiągnięte na powierzchni na 10 000 km

$$B(0) = 0.072 \text{ [pT]}$$

$$d = 300 \text{ m}$$



tłumienie na 300 m $T = 104.3 \text{ [dB]}$

pole w oceanie $B(300) = 0.0000005 \text{ [pT]}$

antena magnetyczna 3 m $B_n = 0.00003 \text{ [pT]}$ $\longrightarrow$

osiągnięte $d \approx 200 \text{ m}$

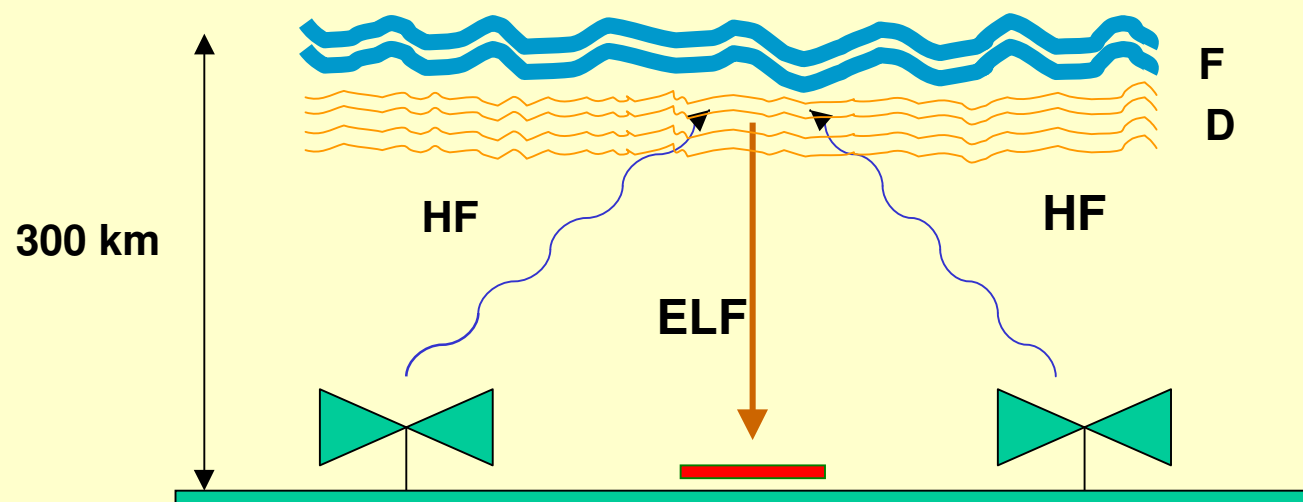
Nowe metody generacji pól ULF/ELF

- 1962 zdetonowanie ładunku jądrowego w atmosferze - emisja ELF**
- 1968 wynalazek ziemnej anteny nadawczej ELF**
- 1974 Bannister - stacje beconowe do pomiarów propagacji w zakresie ELF**
- 1978 powstanie pierwszego systemu łączności ELF**
- 1986 Ganguly - pierwszy eksperyment „luxemburski” w zakresie ELF**
- 1986 odkrycie rezonansu fal Alfvena w jonosferze - IAR**
- 1990 McCarric - idea wzbudzania 8 Hz poprzez modulację prądu zorzowego**
- 1995 początek projektu HAARP**
- 1996 pierwszy naziemny eksperyment aktywny ULF**
- 2003 finalne stadium projektu HAARP**

Generacja ELF drogą mieszania pól HF w jonosferze

1986 - S. Ganguly - Rice University, Houston - Arecibo Observatory

(współczesna wersja eksperymentu luxemburskiego)



$$f_1 = 5\,100\,000\text{ Hz}$$

$$P = 400\text{ kW}$$

$$G = 25\text{ dB}$$

$$f_2 - f_1 = 5\text{ Hz}$$

$$B = 0.16\text{ pT Hz}^{-1/2}$$

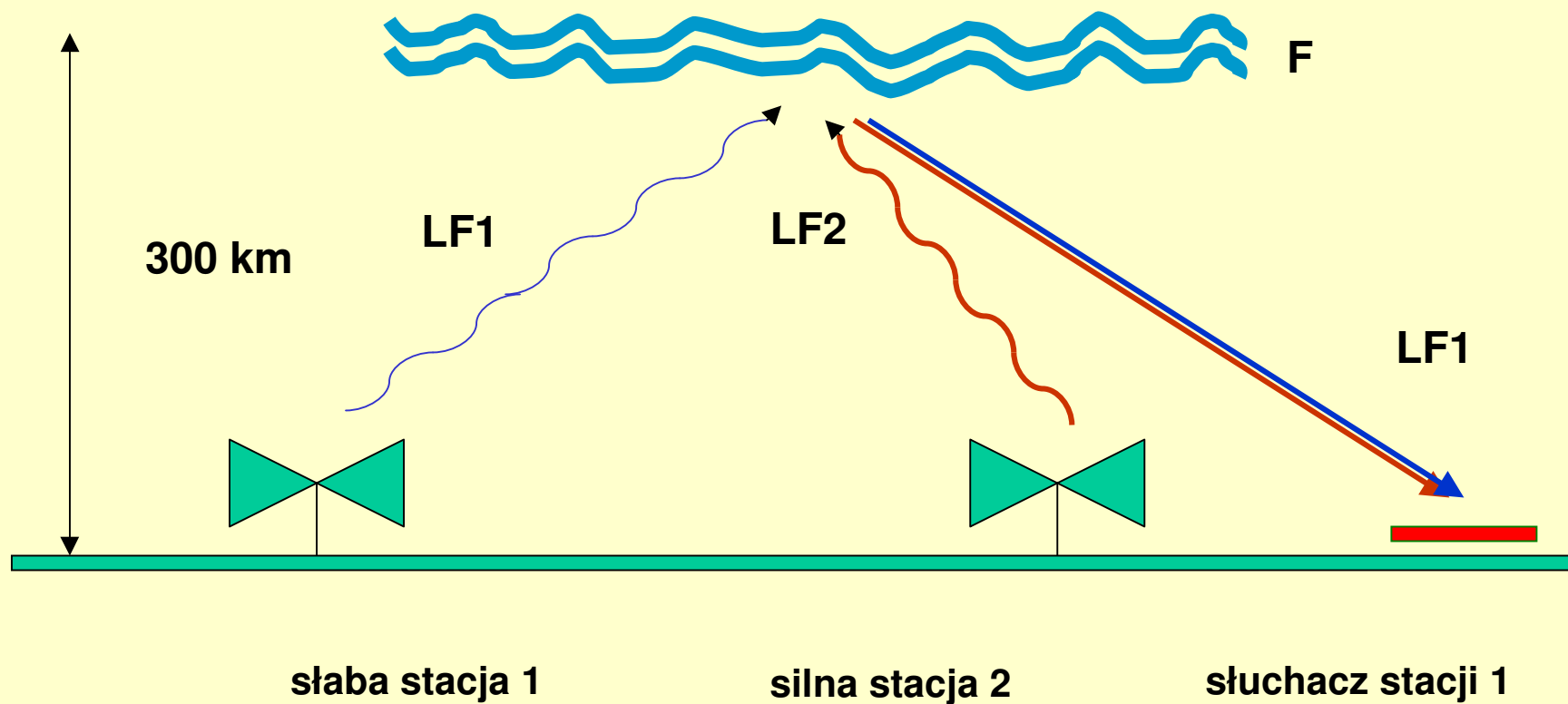
$$f_2 = 5\,100\,005\text{ Hz}$$

$$P = 400\text{ kW}$$

$$G = 25\text{ dB}$$

Zjawisko luksemburskie 1935

zjawisko luksemburskie → zjawisko przeniesienia modulacji 2 ⇒ 1



Wyniki eksperymentu Ganguly

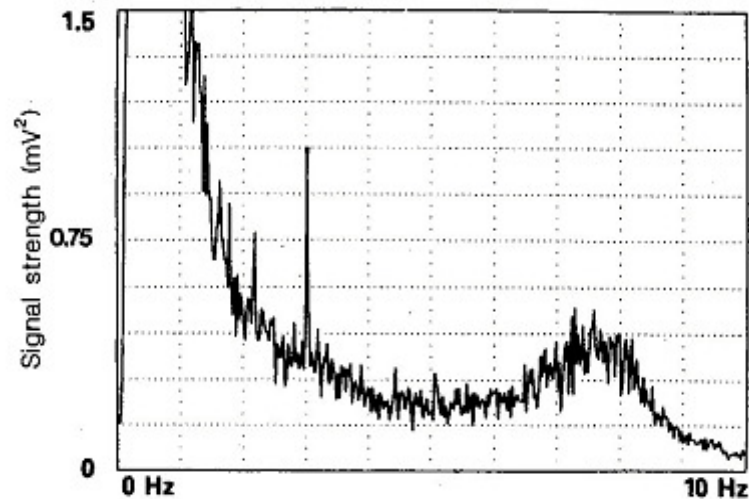


Fig. 2 Spectrum of the received signal (similar to Fig. 1) averaged over the period 17:30–18:00 AST. The difference frequency was 3.0 Hz. The vertical scale corresponds to $2.6 \times 10^{-17} \text{ G}^2 \text{ Hz}^{-1}$. The magnitude of the 3.0-Hz signal is $\sim 340 \times 10^{-11} \text{ G Hz}^{-1/2}$.

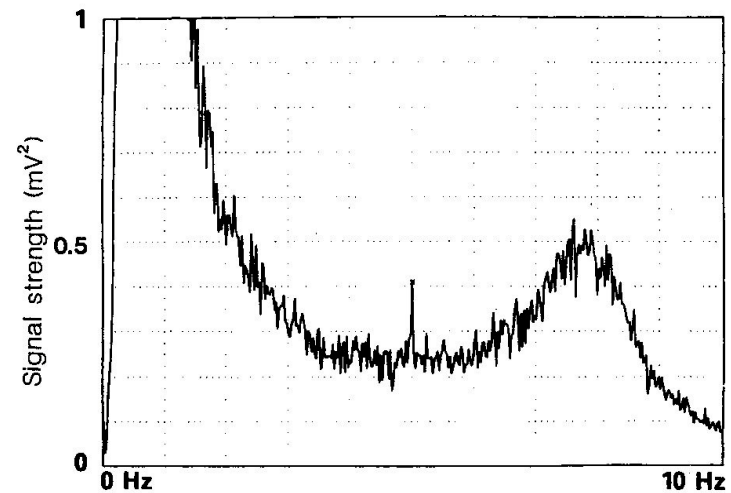
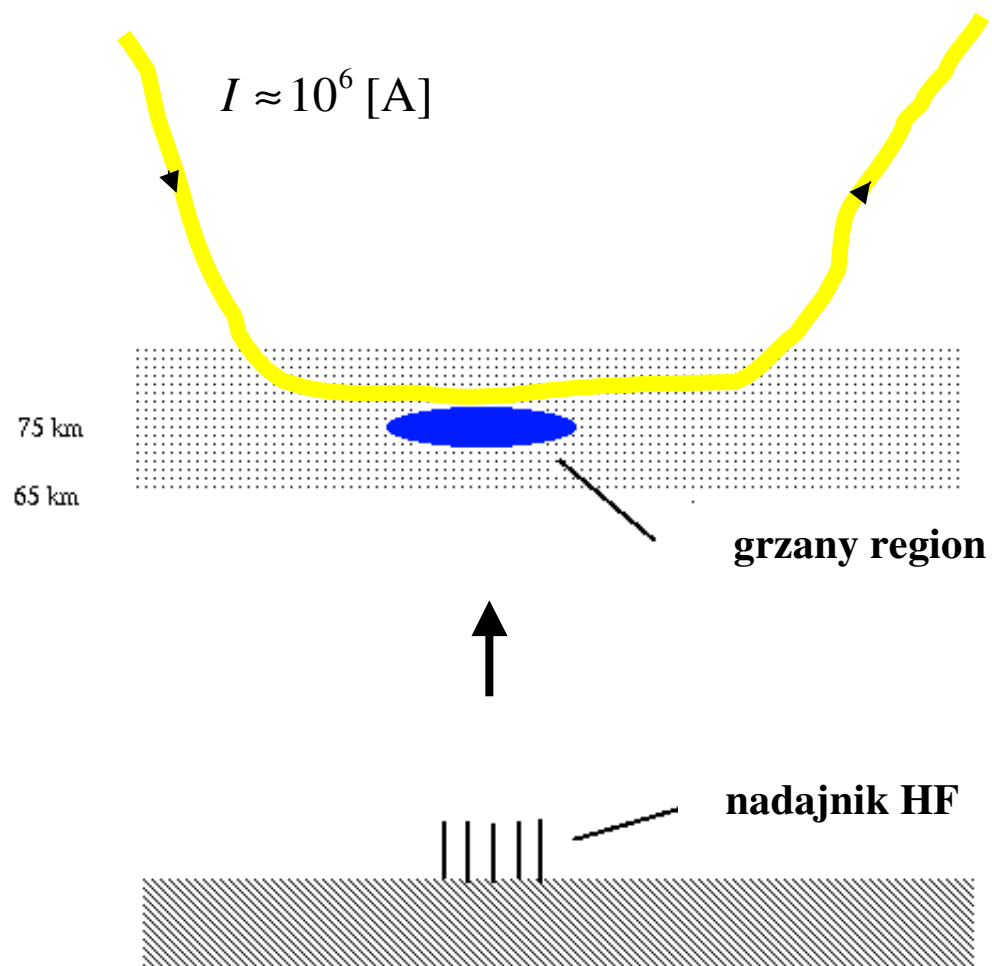


Fig. 1 Spectrum of the received signal in the 0–10 Hz band. Signal strength in mV^2 corresponds to $1.7 \times 10^{-17} \text{ G}^2 \text{ Hz}^{-1}$, full scale (14 February 1985). The receiver was located at Mona Island. The data cover the period 16:30–17:30 AST. The HF transmitters were operating at 5.1 MHz and with a difference frequency $\Delta f = 5 \text{ Hz}$ during this period. The cursor is located at 5.0 Hz. The magnitude of the 5.0-Hz signal is $\sim 160 \times 10^{-11} \text{ G Hz}^{-1/2}$.

Idea grzania elektrojetu polarnego



2.8 do 10 MHz

Eksperymenty na podgrzewaczach jonosfery

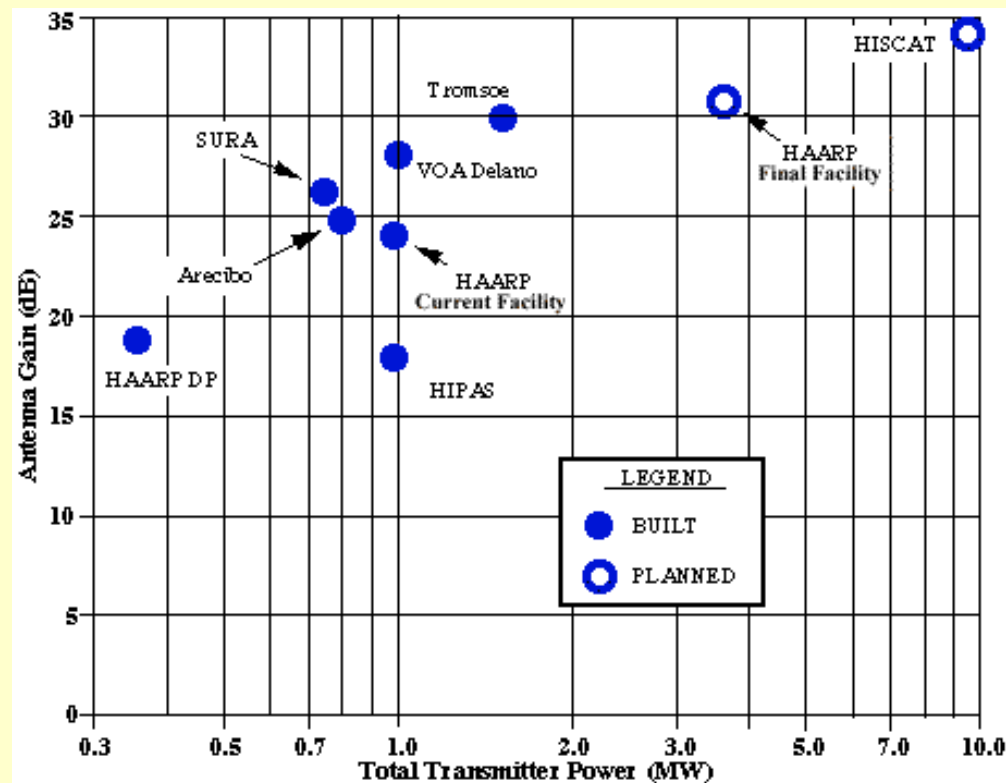
1979 - TROMSO - pierwsza instalacja

1981 - ARECIBO

1991 - SURA

1995 - HAARP

20XX - HISCAT



Projekt HAARP

High frequency Active Auroral Research Project

nadajnik

$$f = 2.8 - 10 \text{ MHz}$$

$$P = 3.6 \text{ MW}$$

$$N = 360 \text{ nadajników } 10 \text{ kW}$$

indywidualne przesuwniki fazowe

CW/AM/PM do 5 kHz

antena

$$G = 31 \text{ dB/10 MHz}$$

$$P_{IRP} = 3600 \text{ MW}$$

$$N = 15 \times 12 = 180 \text{ anten skrzyżowanych}$$

metoda przesuwania wiązki - fazowa

minimalna szerokość wiązki ok. 5°

$$S = 30 \text{ mW/m}^2 / 100 \text{ km} / 10 \text{ MHz}$$

McCarric M. J., Sentman D. D., et. Al., „Excitation of ELF waves in the Schumann resonance range by modulated HF heating of the polar electrojet”,
Radio Sci., v. 25, n. 6, pp. 1291-1298, 1990

koszt projektu: ok. $3e8$ USD

Eksperymenty na podgrzewaczu HAARP

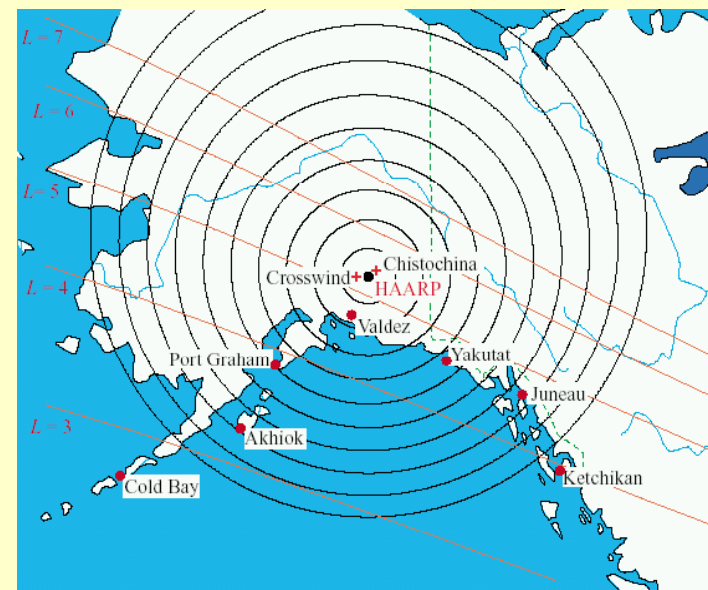
przewodzone są 2 rodzaje badań:

grzanie jonosfery

grzanie elektrojetu polarnego

sposób modulacji nadajnika HF:

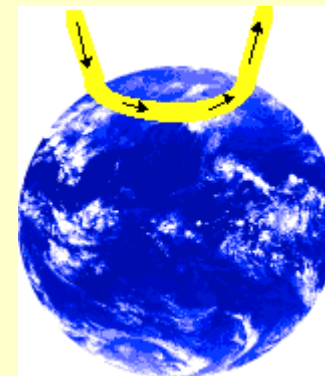
AM, PM



[strona HAARP]



Grzanie elektrojetu polarnego - HAARP



[strona HAARP]



Michał Ostrowski



Adam Michalec



Andrzej Kułak

**dziękujemy
za uwagę**



Piotr Koperski



Jerzy Kubisz



Stanisław Zięba



Anna Odzimek



Janusz Młynarczyk



Zenon Nieckarz