

Systemy nawigacji satelitarnej

Krzysztof Kamiński

Geodezja

Działy:

- **geodezja dynamiczna i grawimetria**
kształt i położenie przestrzenne geoidy
- **geodezja wyższa i astronomia geodezyjna**
badanie kształtu i wymiarów Ziemi na dużych obszarach (ponad 750 km²) i w oparciu o obserwacje astronomiczne
- **geodezja satelitarna**
badanie kształtu i rozmiaru Ziemi z wykorzystaniem sztucznych satelitów

Geodezja

Działy:

- **kartografia geodezyjna**
nauka o konstruowaniu map
- **fotogrametria**
odtworzenie kształtu, rozmiaru i wzajemnego położenia obiektów na podstawie zdjęć fotogrametrycznych
- **teledetekcja**
podobnie jak fotogrametria, ale w szerszym zakresie widma e-m

Geodezja

Działy:

- **geodezja gospodarcza**
(inżynieryjno-przemysłowa, górnicza, rolna)
- **metrologia techniczna** (geodezyjna)
- **geomatyka** (informatyka geodezyjna)

Pomiary geodezyjne

1. Cel pomiarów geodezyjnych: wyznaczenie pozycji punktów (współrzędnych) względem przyjętego układu odniesienia lub względem innych punktów, płaszczyzn, obiektów.
2. Mierzone wielkości:
 - długości odcinków,
 - kąty poziome i pionowe,
 - różnice wysokości.

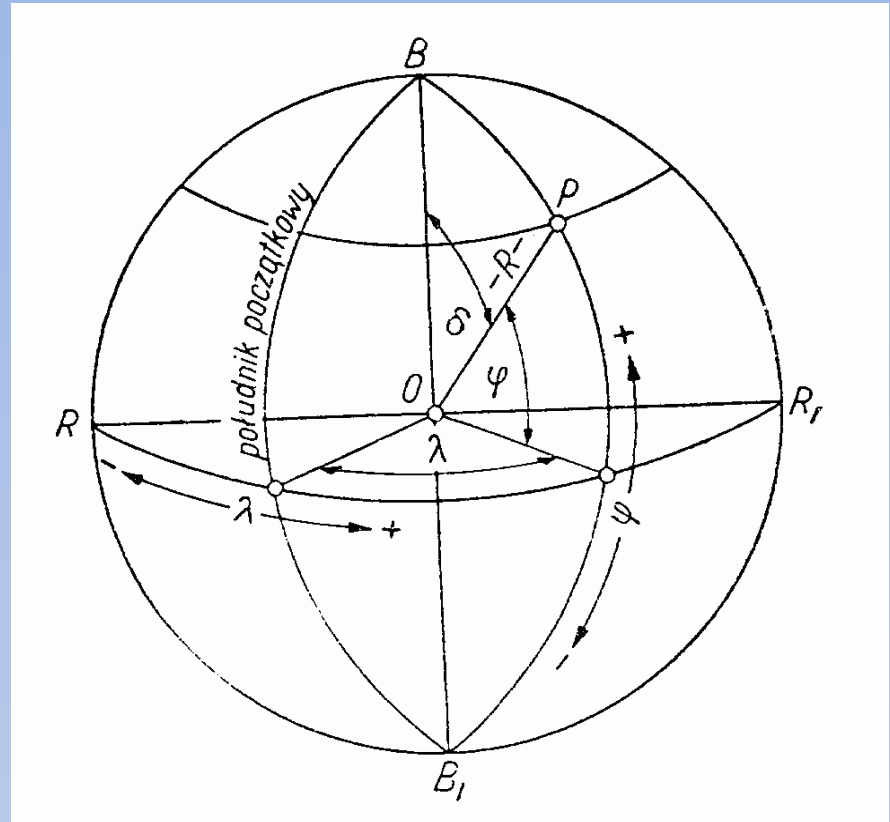
Układy współrzędnych stosowane w geodezji

a) w przestrzeni E^3 :

- ortogonalny $\{X, Y, Z\}$,
- sferyczny $\{\alpha, \beta, r\}$,
- astronomiczny $\{\alpha, \delta, r\}$,
- geograficzny $\{\varphi, \lambda, r\}$,
- horyzontalny $\{\alpha, z, r\}$

b) na płaszczyźnie:

- ortogonalny $\{X, Y\}$,
- biegunowy $\{\alpha, r\}$

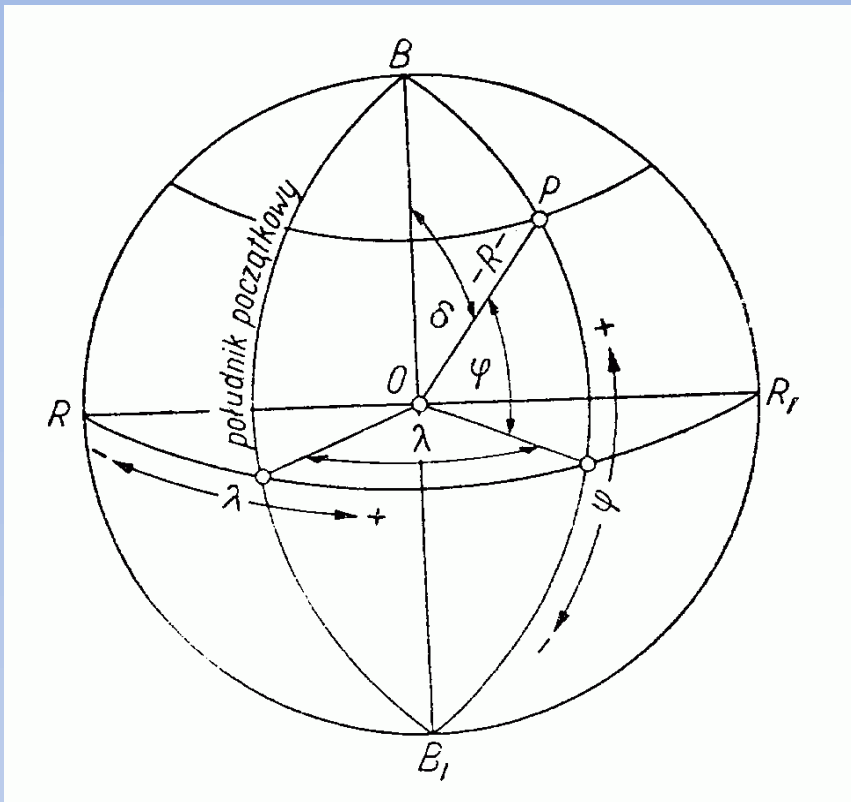


Definicja układu musi uwzględnić:

- położenie początku układu,
- orientację osi

Układy współrzędnych w geodezji geograficznej

φ - szerokość geograficzna, λ - długość geograficzna



układ odniesienia:
lokalny lub globalny

środek układu:
zwykle środek Ziemi

płaszczyzna odn. układu:
płaszczyzna równika Ziemi

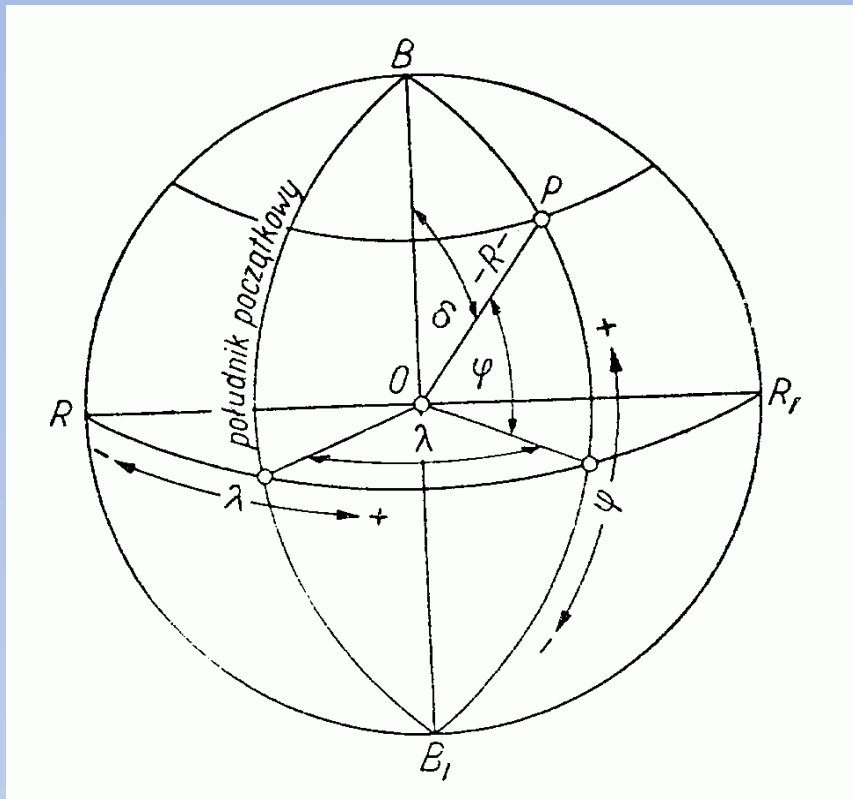
południk początkowy:
w okolicy Greenwich

kształt Ziemi:
sferyczny (lub elipsoidalny)

Układ ten jest również nazywany „geocentrycznym”.

Układy współrzędnych w geodezji geodezyjny

φ - szerokość geodezyjna \neq geograficzna,
 λ - długość geodezyjna = geograficzna



układ odniesienia:
lokalny lub globalny

środek układu:
zwykle **środek masy** Ziemi

płaszczyzna odn. układu:
płaszczyzna równika Ziemi

południk początkowy:
w okolicy Greenwich

kształt Ziemi:
elipsoidalny

Układ ten jest również nazywany myląco „geograficznym”.

Układy współrzędnych w geodezji geodezyjny

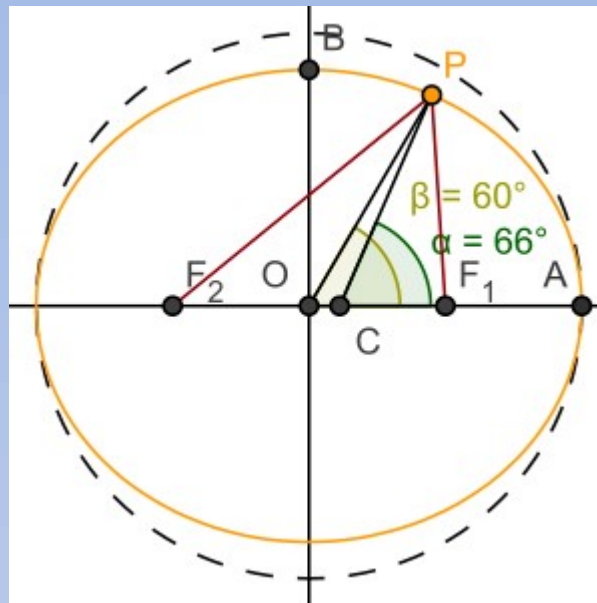


Południk początkowy od 1984r:
"BIH Terrestrial System"
(od 1987r BIH → IERS)
bazuje na ILRS, VLBI i LLR
zachował czas UT1 ale zmienił
układ odniesienia w stosunku
do pomiarów optycznych

Południk dla czasu UT1:
dokładnie w Greenwich



Układy współrzędnych w geodezji geodezyjny



Szerokość geocentryczna – względem sferycznej Ziemi

Szerokość geodezyjna – względem prostopadłej (normalnej) do elipsoidy.

Układy współrzędnych w geodezji

Długość 1 stopnia

W układzie ze sferyczną Ziemią:

$$\Delta_{\lambda}^1 = \frac{\pi}{180} a \cos \varphi$$

$$\Delta_{\varphi}^1 = \frac{\text{obwód sfery}}{360}$$

W układzie z elipsoidalną Ziemią:

$$\Delta_{\lambda}^1 = \frac{\pi a \cos \varphi}{180 \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$\Delta_{\varphi}^1 = \frac{\pi a (1 - e^2)}{180 (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

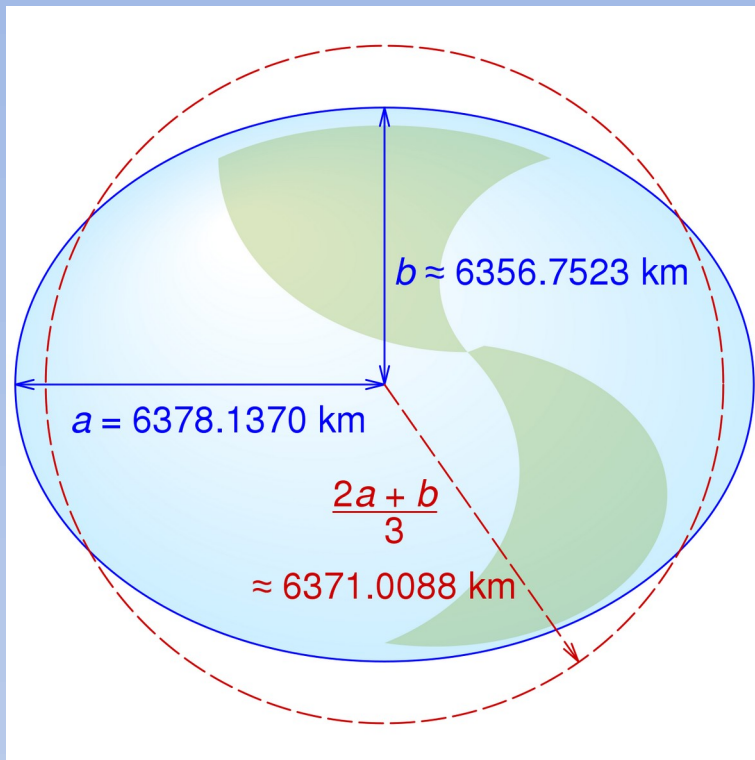
Na równiku:

1 stopień to ok. 111 km,

1' to ok. 1.8km (**mila morska**),

1" to ok. 31m.

Układy współrzędnych w geodezji geodezyjny

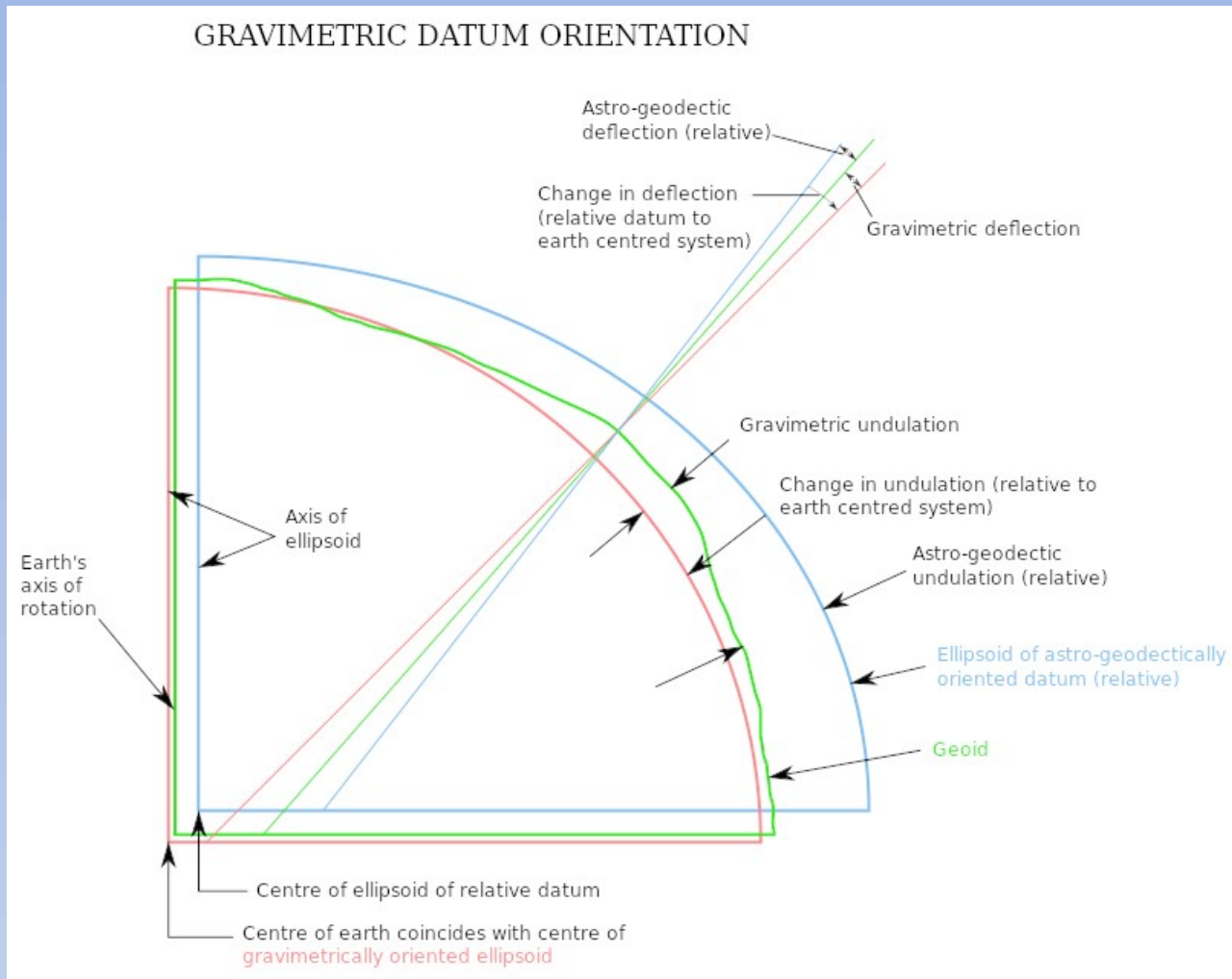


ϕ	Δ_{lat}^1	Δ_{long}^1
0°	110.574 km	111.320 km
15°	110.649 km	107.550 km
30°	110.852 km	96.486 km
45°	111.132 km	78.847 km
60°	111.412 km	55.800 km
75°	111.618 km	28.902 km
90°	111.694 km	0.000 km

WGS 84 – World Geodetic System 84

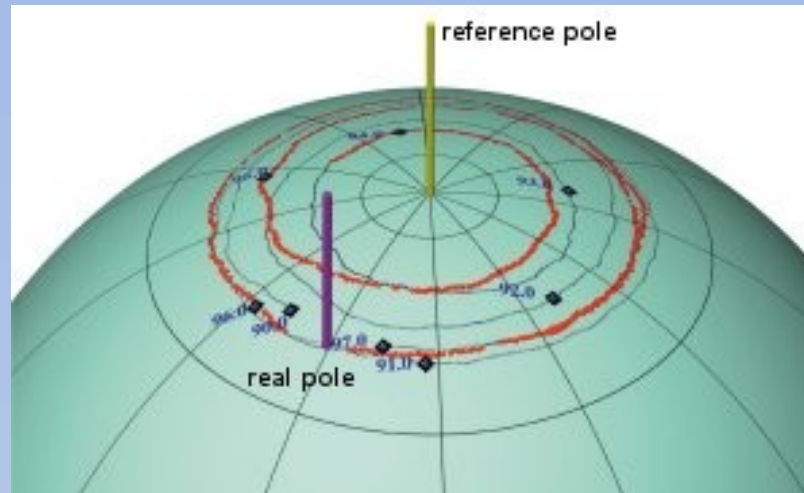
Geodetic datum = elipsoida układu odniesienia

Układy współrzędnych w geodezji geodezyjny



Szerokość względem geoidy (astronomiczna),
geodezyjna lokalna i geodezyjna globalna.

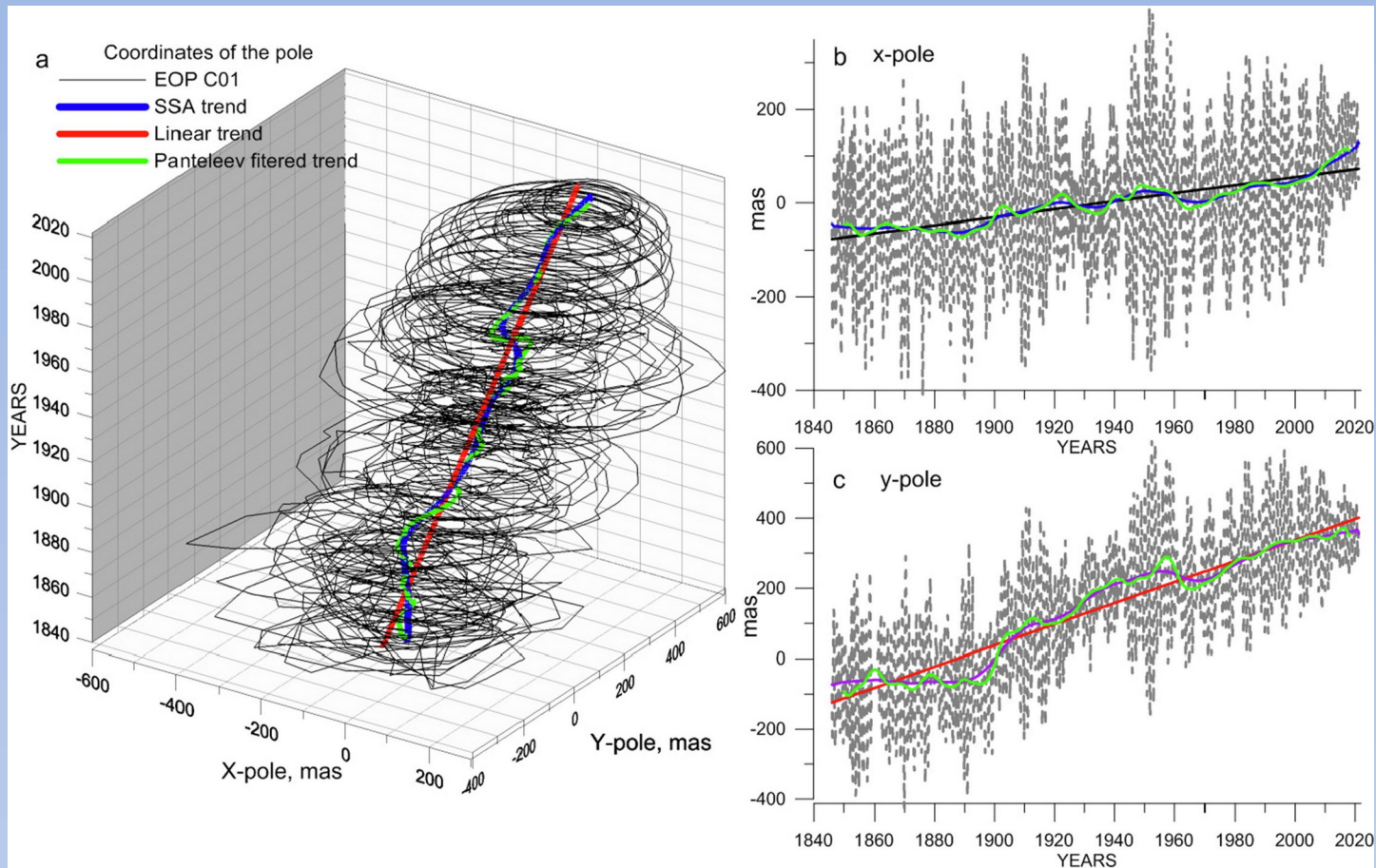
Układy współrzędnych w geodezji



Ruchy bieguna Ziemskiego, czyli osi rotacji Ziemi względem bryły Ziemi (ang. polar motion)

Conventional International Origin – średnia pozycja bieguna w 1900r.

Układy współrzędnych w geodezji



Ruchy bieguna Ziemi (osi rotacji Ziemi) w latach 1840-2020 (ang. polar motion) względem czego?

Układy współrzędnych w geodezji

Składowe ruchów bieguna Ziemi:

- oscylacja Seta Chandlera (1891) z okresem ok 435 dni
(= wolna nutacja (spłaszczenie Ziemi) \neq nutacja (oddziaływanie Sł. i Ks.))
- oscylacja roczna
- nieregularny systematyczny dryf mniej więcej w stronę południka 80° W w tempie ok. 10cm / rok

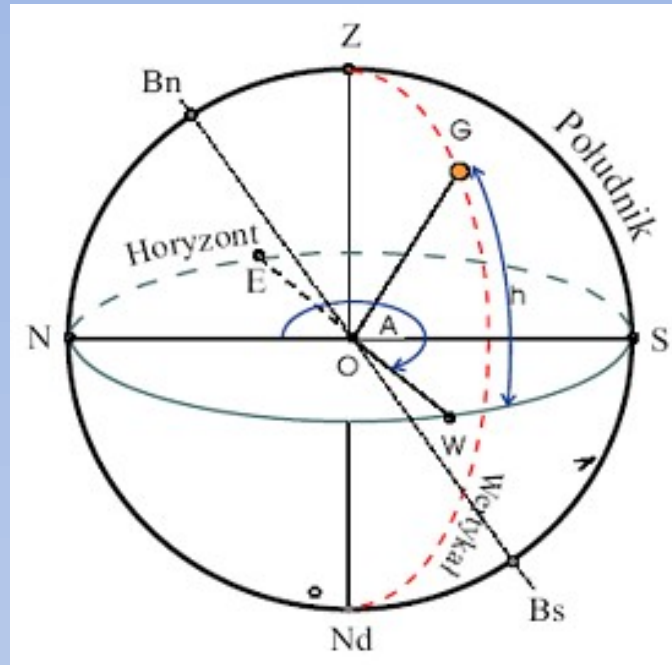
Roczna amplituda ruchu bieguna to ok 9m,
okres roczny i Chandlera dają razem dudnienia z okresem 5-8 lat.

Przyczyny ruchów bieguna Ziemi:

- ruchy materii w jądrze i płaszczu Ziemi,
- ruchy izostatyczne po ostatnim zlodowaceniu,
- topnienie lodów Grenlandii.

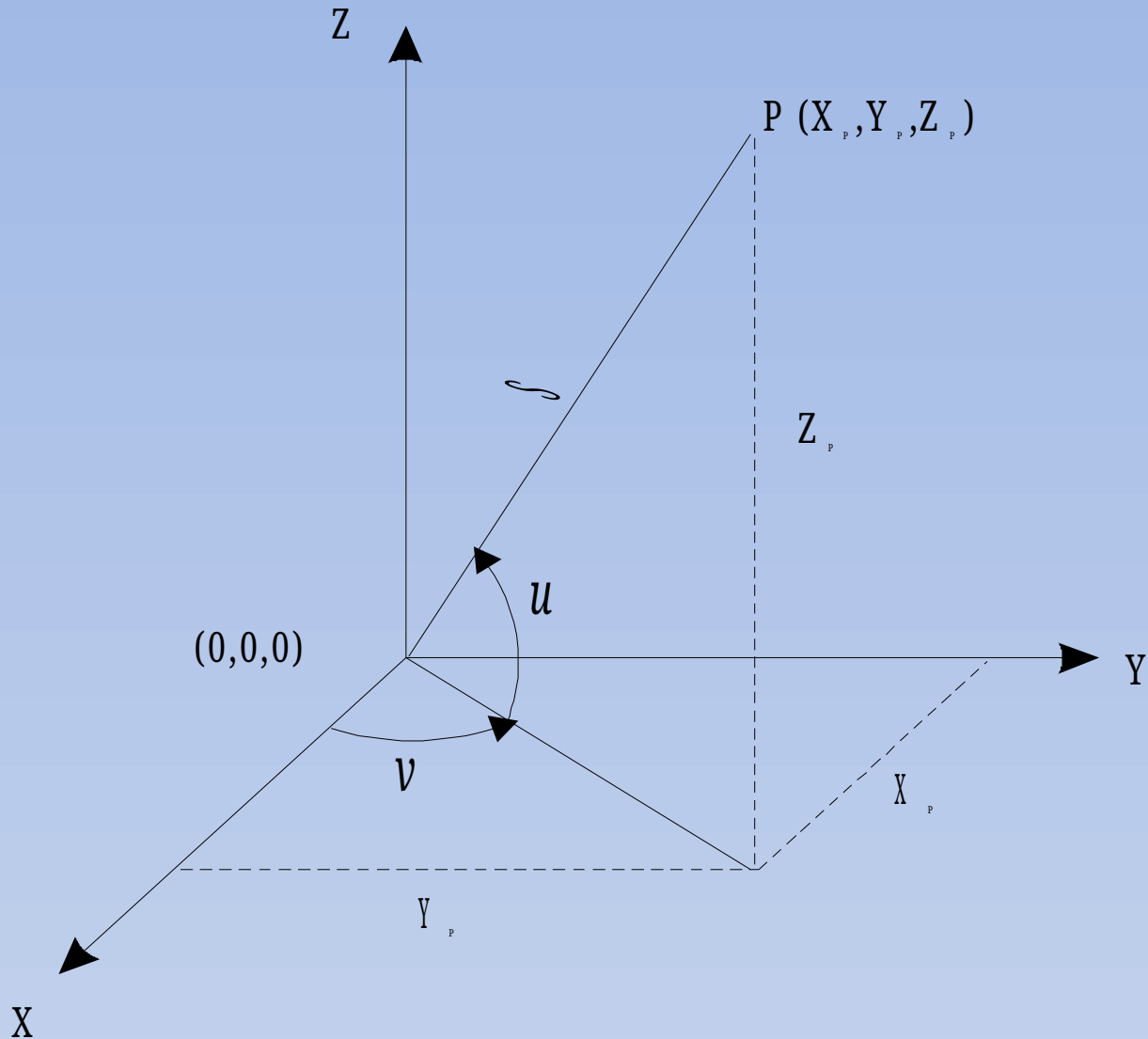
Te ruchy nazywa się również nutacją,
ale nie mają one nic wspólnego z nutacją znaną w astronomii.

Układ horyzontalny



A – azymut, h – kąt pionowy (wysokość), z – odległość zenitalna

Współrzędne prostokątne X, Y, Z



Transformacje współrzędnych sferyczne do kartezjańskich

Współrzędne geocentryczne:

$$x = r \cos \varphi \cos \lambda$$

$$y = r \cos \varphi \sin \lambda$$

$$z = r \sin \varphi$$

założenia:

λ od 0° do 360°

φ od -90° do $+90^\circ$

układ - prawoskrętny

Współrzędne geodezyjne:

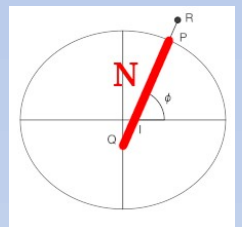
$$x = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$z = \left(\frac{b^2}{a^2} N + h \right) \sin \varphi$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}$$

N – wertykalny
promień krzywizny



Transformacje współrzędnych

kartezjańskie do sferycznych

Współrzędne geocentryczne:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\lambda = \operatorname{atan} 2 \frac{y}{x}$$

$$\varphi = \arcsin \frac{z}{r}$$

$$z = r \sin \varphi$$

założenia:

λ od 0° do 360°

φ od -90° do $+90^\circ$

układ – prawoskrętny

$\operatorname{atan} 2$ – funkcja \arctan ustalająca prawidłowo ćwiartkę kąta

Współrzędne geodezyjne:

$$\lambda = \operatorname{atan} 2 \frac{y}{x}$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{z / \sqrt{x^2 + y^2}}{1 - e^2 N / (N + h)} \right)$$

$$h = p / \cos \varphi - N$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}$$

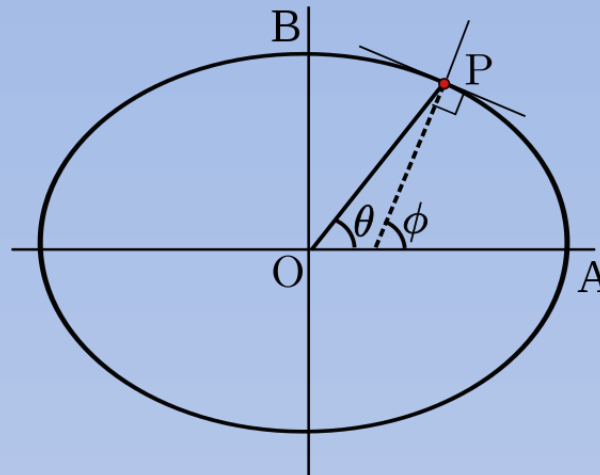
Metody iteracyjne: Newtona-Rapsona, Lodovico de Ferrari

Układy współrzędnych w geodezji

Szerokość geodezyjna ϕ i geocentryczna θ

$$\tan \theta = (1 - e^2) \tan \phi$$

$$e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$$



Różnica w szerokości geodezyjnej i geocentrycznej

$$\theta - \phi = -11.5' \sin(2\phi)$$

Transformacje współrzędnych

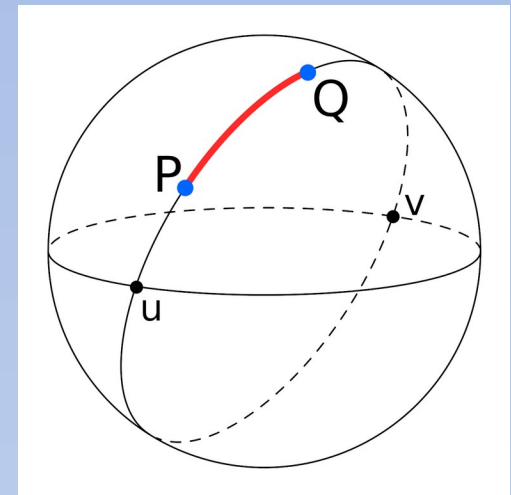
rozmiar kątowy łuku

Współrzędne geocentryczne – odległość kątowa wzdłuż koła wielkiego σ :

$$\cos \sigma = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\Delta \lambda)$$

Współrzędne geodezyjne i geocentryczne:

$$\cos \sigma = \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$$



ORTODROMA (ang. great circle) – najkrótsza droga na sferze

GEODEZYJNA (ang. geodesic) – najkrótsza droga na dowolnej powierzchni

Transformacje współrzędnych

długość łuku

Współrzędne geocentryczne – długość ortodromy L:

$$L[km] = \sigma \frac{\pi}{180} O$$

Współrzędne geodezyjne – długość geodezyjnej L:

$$\tan \beta = (1 - f) \tan \varphi$$

$$f = (a - b) / a$$

$$P = (\beta_1 + \beta_2) / 2$$

$$Q = (\beta_2 - \beta_1) / 2$$

$$X = (\sigma - \sin \sigma) \frac{\sin^2 P \cos^2 Q}{\cos^2 \sigma / 2}$$

$$Y = (\sigma + \sin \sigma) \frac{\cos^2 P \sin^2 Q}{\sin^2 \sigma / 2}$$

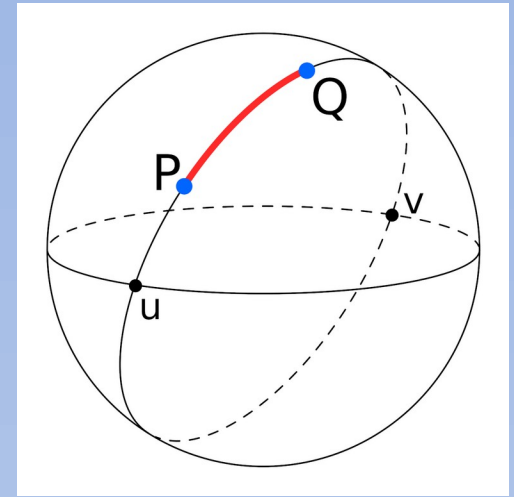
$$L = a (\sigma - f / 2 (X + Y))$$

β – szerokość zredukowana

σ – kąt między (λ_1, β_1) i (λ_2, β_2)

f – spłaszczenie elipsy

Formuła dokładna do 10m / 1000km



Mapy

Mapa jest to obraz fizycznej powierzchni ziemi na płaszczyźnie w przyjętym odwzorowaniu kartograficznym i założonej skali z symbolicznym przedstawieniem obiektów i ukształtowania.

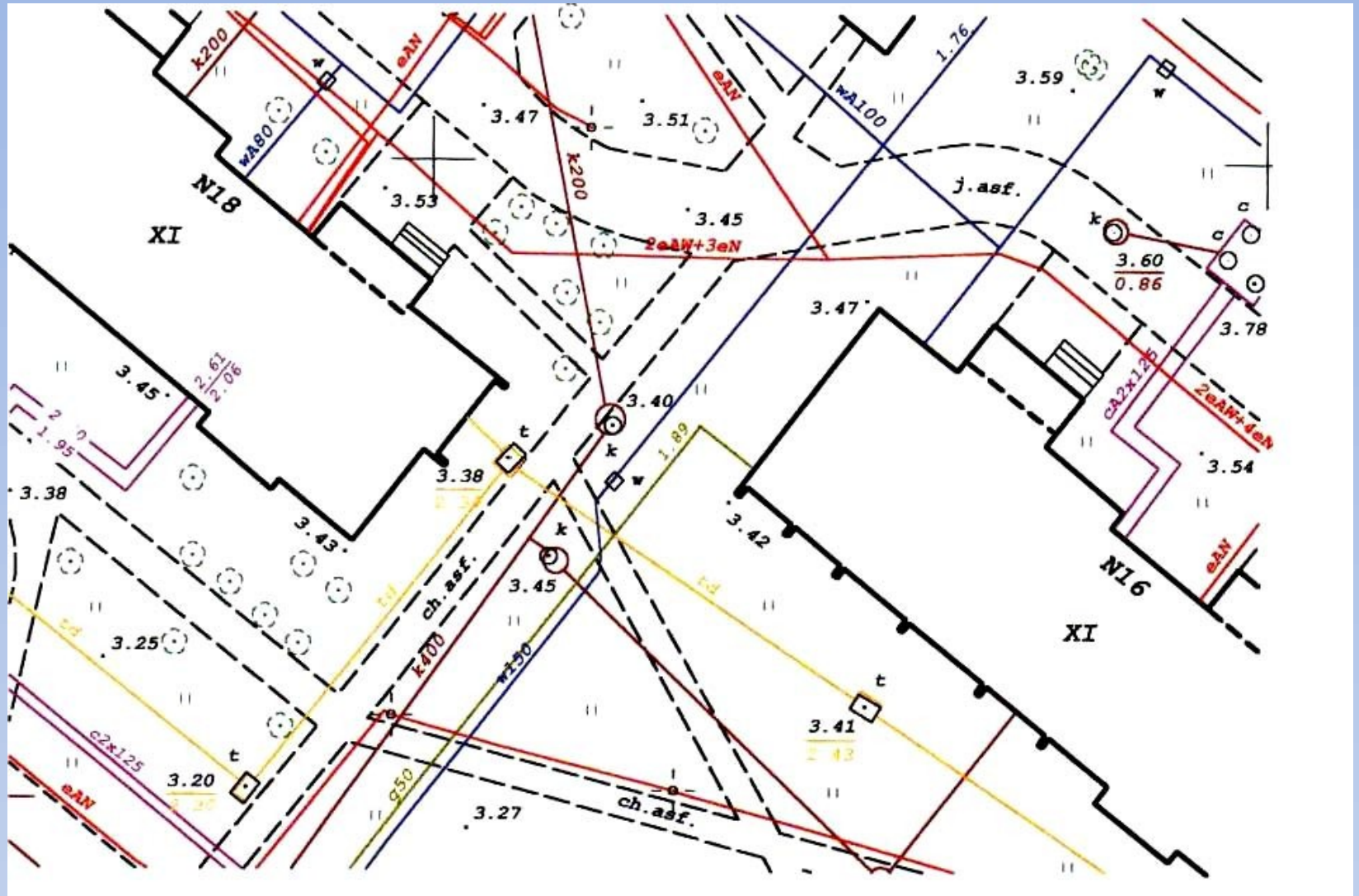
Treść map - znaki umowne, punkty wysokościowe (pikiety), warstwice, siatka współrzędnych, opisy.

Skala mapy – zależność pomiędzy długością odcinka łączącego 2 punkty na mapie i odległością odpowiadających im punktów na powierzchni odniesienia 1 : M.

$M=D/d$ – **mianownik skali mapy**

$$\frac{1}{M} = \frac{d}{D}$$

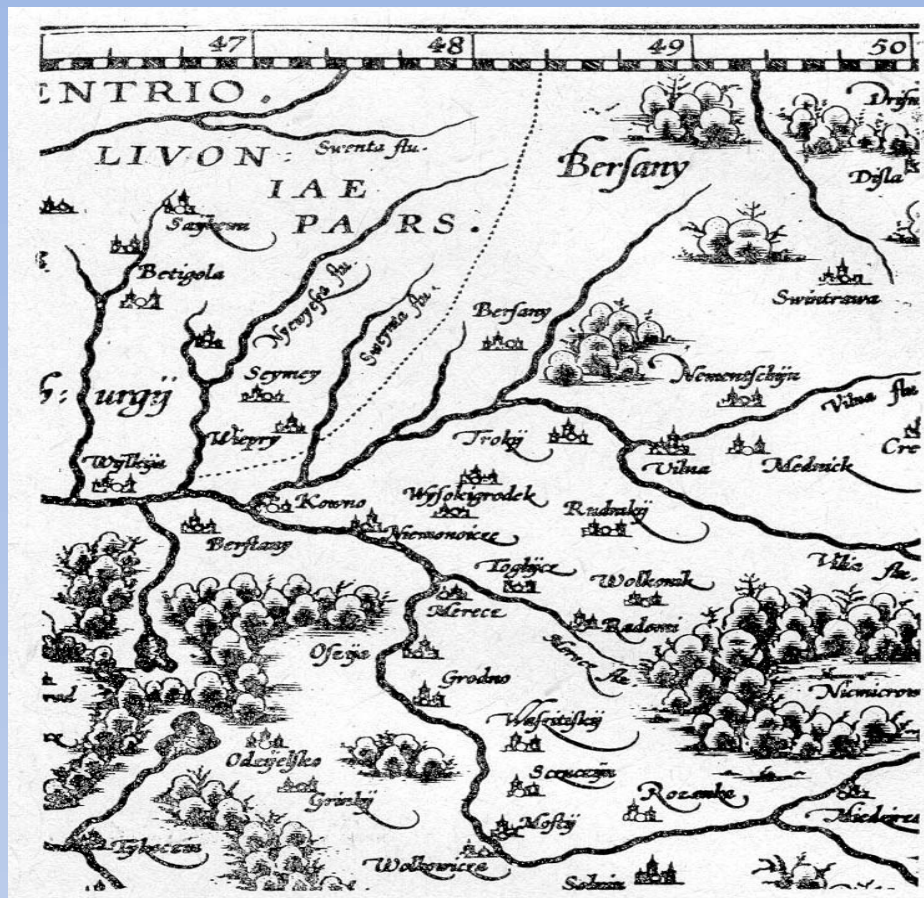
Mapa zasadnicza



Mapa z okresu średniowiecza



Mapa z XVI wieku



Mapa topograficzna



ORTOFOTOMAPA

m. Kutno, pow. Kutnowski, woj. Łódzkie



102.431.4

1:5000

układ współrzędnych 1965

ORTOFOTOMAPA

wykonana w 2002 r. przez

GEO-METRIC spółka z o.o.
00-658 Warszawa, ul. Ciołkowska 100S



na zlecenie w dniu 7.2000 r. z zakresu 1000 roku.

Urządzenie ortofotomapa
opracowanie zlecenie na podstawie
Urzędu Miejskiego w Kutnie



Specjalistyczny sprzęt do pomiarów geodezyjnych

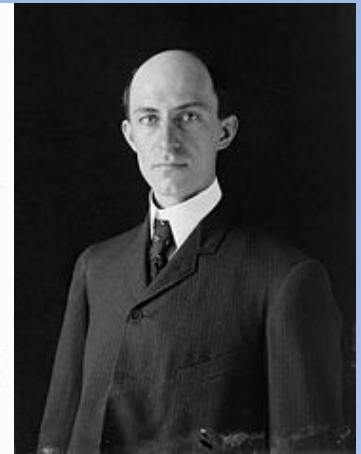
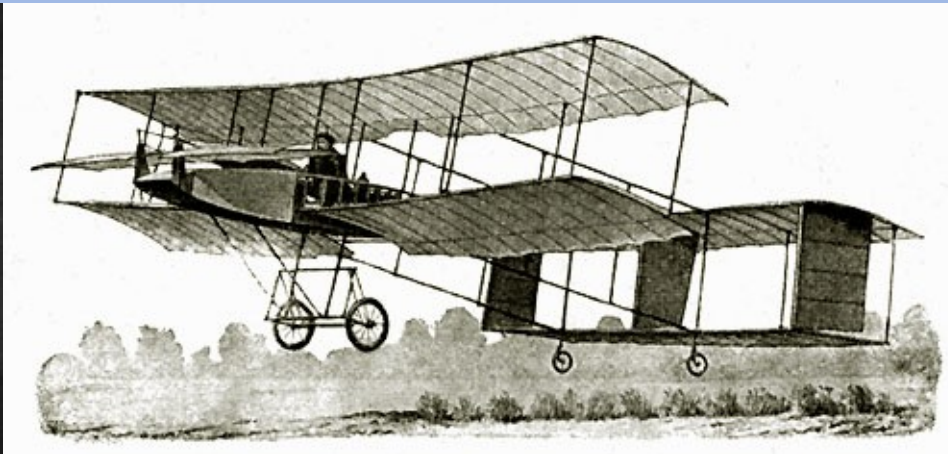
- Przymiary wstępowe – taśmy, ruletki
- Węgielnice
- Tyczki geodezyjne
- Dalmierze
- Niwelatory
- Teodolity
- Odbiorniki GPS



Pierwszy samolot - 1903

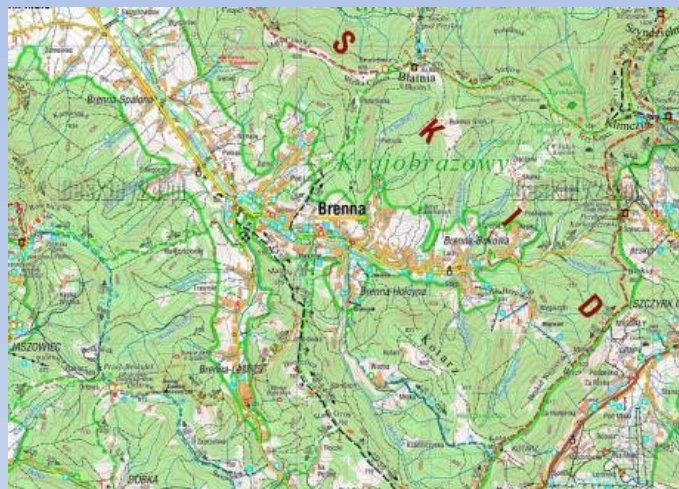


Orville Wright
(1871-1948)



Wilbur Wright
(1867-1912)

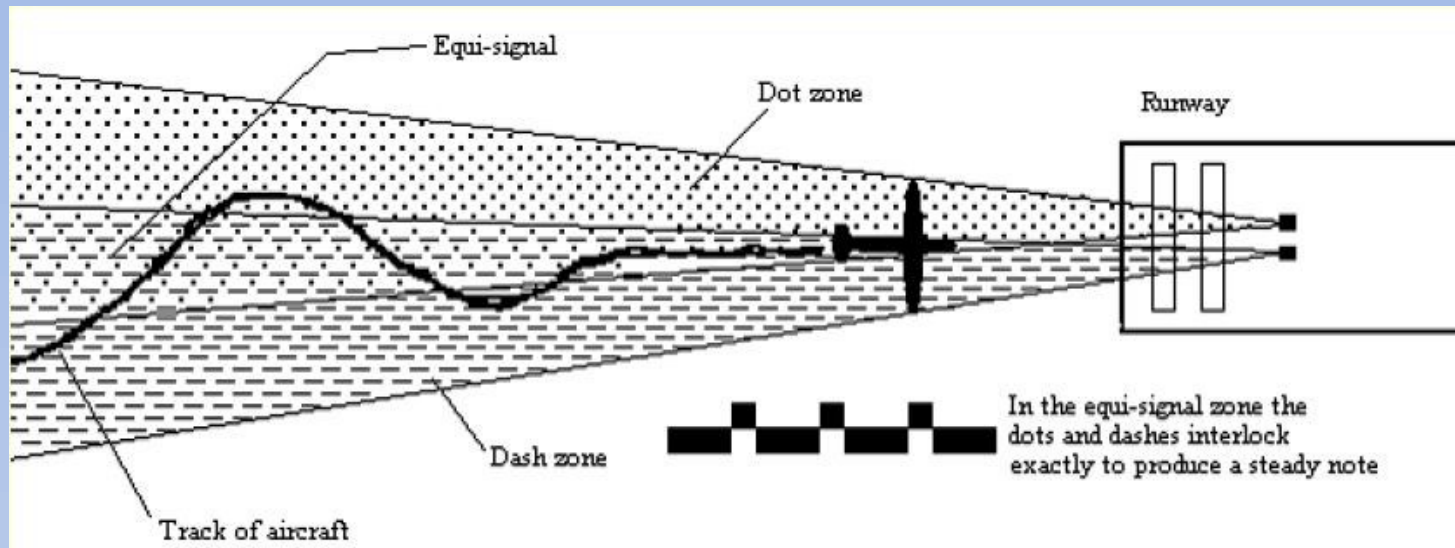
Nawigacja za pomocą mapy



1932

System lądowania Lorenz

Wykorzystuje fale radiowe - jeden z najstarszych systemów lądowania samolotów według wskazań przyrządów w warunkach złej widoczności (zasięg: ok. 50 km, dokładność ok. 1m)



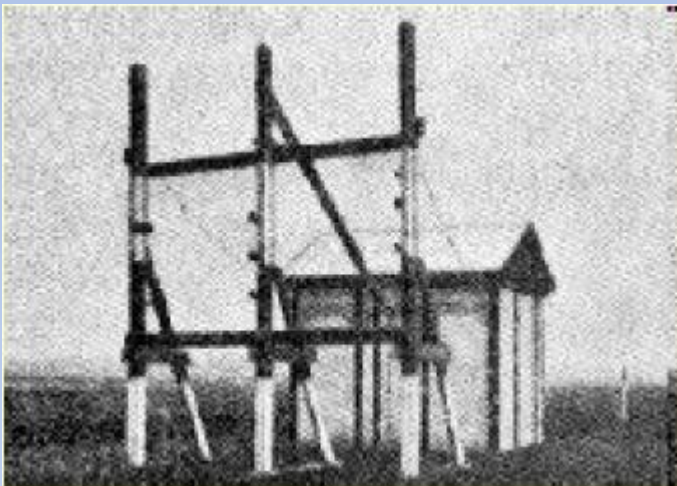
Sercem systemu były dwie anteny kierunkowe emitujące dwie wiązki fal radiowych, nakładające się na siebie wzdłuż środka pasa lądowania. Anteny były na przemian podłączane do nadajnika, który emitował sygnały alfabetu Morse'a. Powodowało to, że jedna nadawała tylko kreski, a druga tylko kropki tego alfabetu. Nakładające się wzdłuż osi pasa lądowania sygnały tworzyły wąski obszar sygnału ciągłego.

W systemie Lorenza wykorzystywano częstotliwości od 28 do 35 MHz.

1932

System lądowania Lorenz

Procedura lądowania przy wykorzystaniu systemu Lorenza rozpoczynała się od nastawienia znajdującego się w samolocie odbiornika na właściwą częstotliwość. Następowo było to około 30 km od lotniska docelowego. Jeżeli pilot był w zasięgu nadajnika, mógł usłyszeć trzy rodzaje sygnałów: kreski, kropki lub sygnał ciągły. Jeżeli słyszał kropki znaczyło to, że znajduje się na lewo od pasa lotniska i musi skręcić w prawo. W przypadku, gdy słyszał kreski sytuacja była odwrotna i trzeba było skręcić w lewo. W wyniku korekt kursu pilot osiągał strefę ciągłego sygnału i podążał za nią w kierunku lotniska. W miarę zbliżania się strefa ta stawała się coraz węższa, aż w końcu była węższa niż pas lądowania.



system Lorenza na Okęciu w 1937

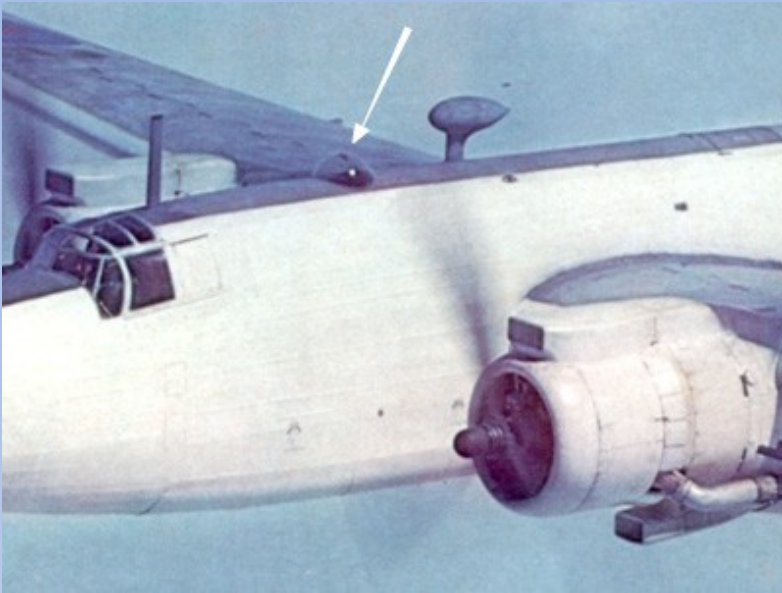
Dodatkowo nadawano sygnały:
VEZ – 3km, **HEZ** - 300m

Od 1934 standard międzynarodowy,
w 1936 - 40 lotnisk w Europie.

W USA rozwijano system Diamon-Dunmore od końca lat 20-tych, działał podobnie ale bazował na instrumentach więc był bardziej skomplikowany i się nie przyjął.

późne lata 1930

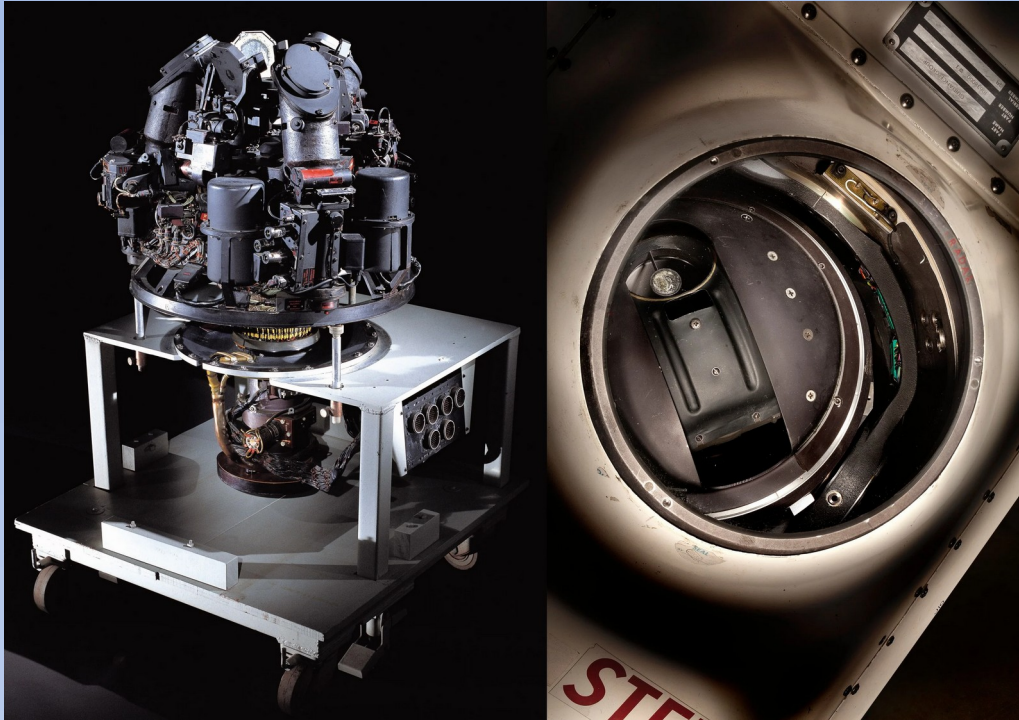
Astrodome



Lotnictwo bombowe RAF stawiało na początku II WŚ na nocne loty i nawigację astronomiczną z wykorzystaniem m.in. sekstansów lotniczych.

lata 1966-99

Blackbird



Astronomiczno-inercyjny system nawigacji samolotu SR-71 Blackbird

1939

System Knickebein (krzywa noga)

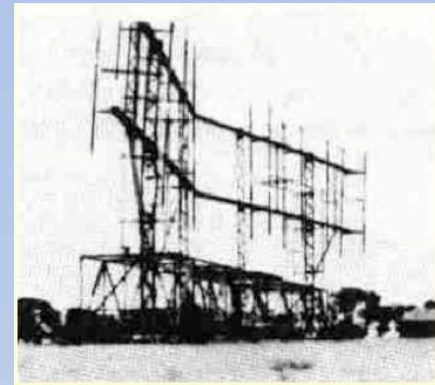
Budowa i procedura nawigacja podobna jak w systemie Lorenz.

Nowe anteny zwiększyły zasięg do ok. 500 km
z dokładnością prowadzenia samolotu ok. 100 m.

„Knickebein” używany był przez Luftwaffe podczas nocnych lotów nad terenami Wielkiej Brytanii od początku wojny. Pierwszą parę instalacji nadawczych o wysokości ok. 30 m zbudowano na terenie Niemiec w Cleves i Bredstedt.



antena Cleves



antena Bredstedt

1939

System lądowania Knickebein (krzywa noga)

„Knickebein” został nazwany przez wywiad angielski „Headache”, ale na początku wielu nie wierzyło w jego istnienie.

Podejrzewano, że krzywizna Ziemi jest zbyt duża.

Przeprowadzono jednak test za pomocą amatorskiego radia (gdyż RAF nie miał sprzętu na odpowiednią częstotliwość) i wykryto krzyżujące się sygnały nad fabryką silników lotniczych.

Przeciwdziałania stosowane w WB otrzymały kryptonim „Aspirin”.

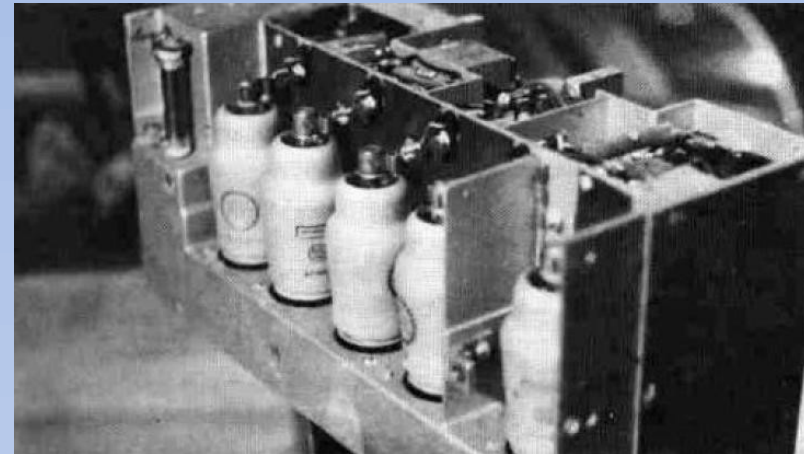
Odbiorniki tego systemu były maskowane w bombowcach jako zwykłe odbiorniki systemu Lorenz.

1939

System nawigacji Knickebein



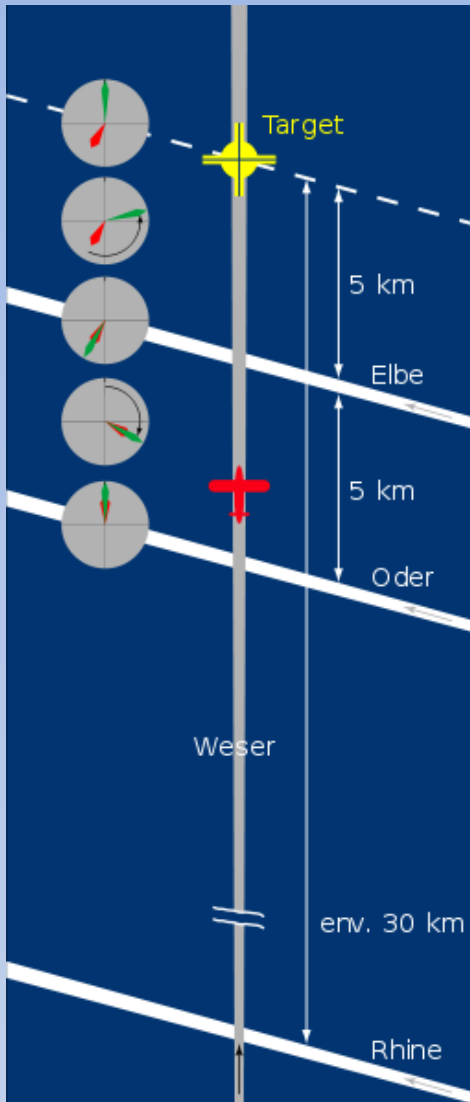
Odbiornik systemu
montowany w samolocie



Anglicy nadawali fałszywe „kropki”
myląc pilotów bombowców.

1940

System nawigacji X-Gerät



Dokładność tego systemu wynosiła ok. 90 m przy odległości od celu wynoszącej 320 km. System był w pełni automatyczny i pracował na wyższej częstotliwości 60 MHz.

Samoloty z KGr 100 wyposażone w aparaturę systemu X-Gerät zrzucały nad celem flary i materiały zapalające naprowadzając w ten sposób resztę sił (bo brakowało aparatów dla wszystkich).

Początkowe zakłócenia były nieskuteczne gdyż system akceptował jedynie dokładnie wybrane Hz, a pomiary brytyjskie były błędne.

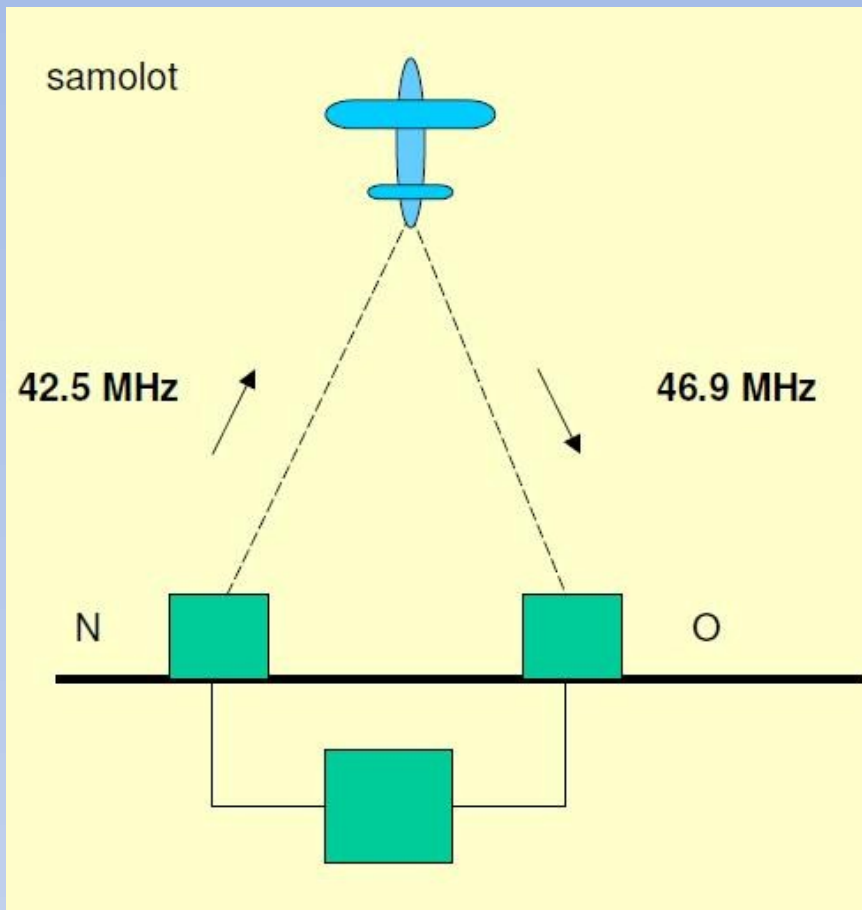
Po analizie rozbitego bombowca poprawiono to i nadawano „fałszywą Elbę”.

Oprócz zakłócania odpalano też fałszywe flary.

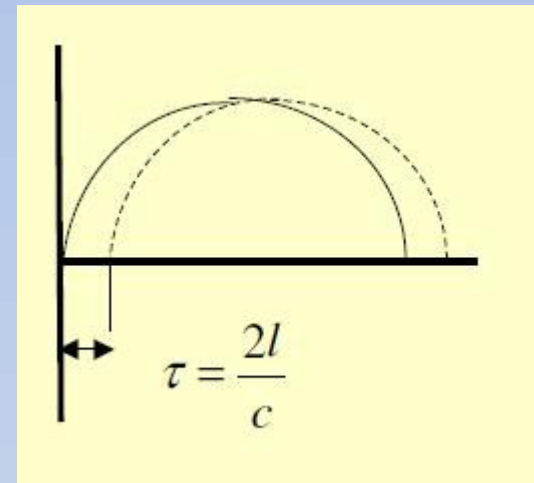
1941

System nawigacji Y-Gerät

Y-Gerät w przeciwieństwie do poprzedników opierał się na jednej wiązce sygnałów radiowych.

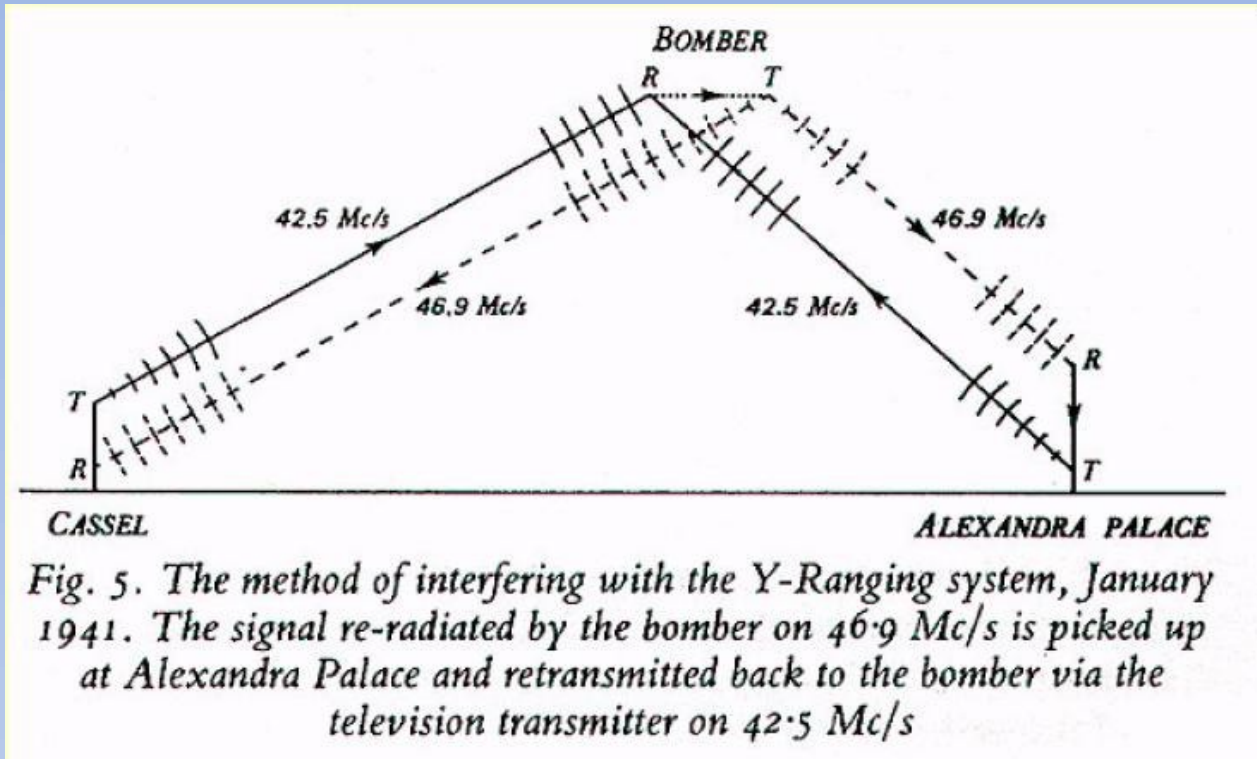


Samolot naprowadzany był przez stację, która nadawała dwa sygnały; jeden określał odległość, a drugi kierunek. Sygnał służący do oceniania dystansu przechwytywany był przez transponder samolotu i odsyłany do stacji macierzystej, która określała odległość, w jakiej znajduje się samolot.



1941

System nawigacji Y-Gerät



Brytyjskie przeciwdziałanie przeciwko systemowi „Benito” bo taki kryptonim otrzymał Y-Gerät w Wielkiej Brytanii polegało na przechwytywaniu sygnału z samolotu, przesyłaniu go drogą kablową do nadajnika i wyemitowaniu go z powrotem. Istniały dwie takie stacje oznaczone kryptonimem „Domino”, wykorzystywano nadajnik TV w Londynie na „Alexandra Palace”.

1941

System nawigacji Y-Gerät



Odbiorniki systemu Y-Gerat



Wadą było sterowanie z ziemi, co powodowało, że w tym samym czasie jedna stacja mogła obsługiwać tylko jeden samolot. Dodatkowo samolot przekazywał odbite sygnały radiowe, co ułatwiało jego namierzenie.

1941

System nawigacji Y-Gerät

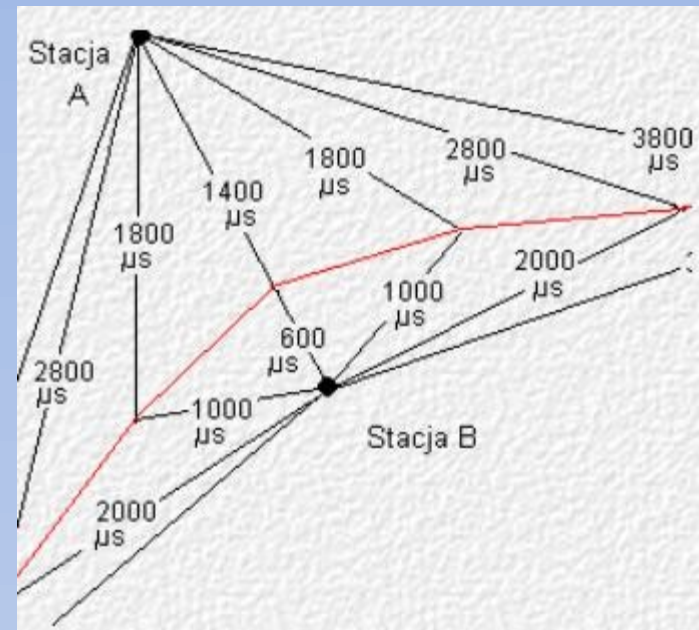
System Y-Gerät został wykryty poprzez odszyfrowanie kodu enigmy z nieznanym wcześniej kryptonimem: „Wotan”, który oznaczał jednookie bóstwo, co poprawnie uznano za jedno-wiązkowy system naprowadzania. Był on nieskuteczny od samego początku, ale sygnały zakłócające miały stopniowo zwiększaną moc, przez co Niemcy początkowo interpretowali je jako problemy techniczne.

Gdy Niemcy zdali sobie sprawę, że system jest zagłuszany od początku porzucili całkowicie nawigację radiową swoich bombowców.

1942

System nawigacji hiperbolicznej

Nazwa systemów hiperbolicznych bierze się stąd, że zbiory punktów o stałej różnicy odległości od dwóch radiolatarni (izochrony) mają kształt hiperbol. Statek powietrzny odbierając sygnały dwóch radiolatarni wyznacza jedną hiperbolę, na której się znajduje.



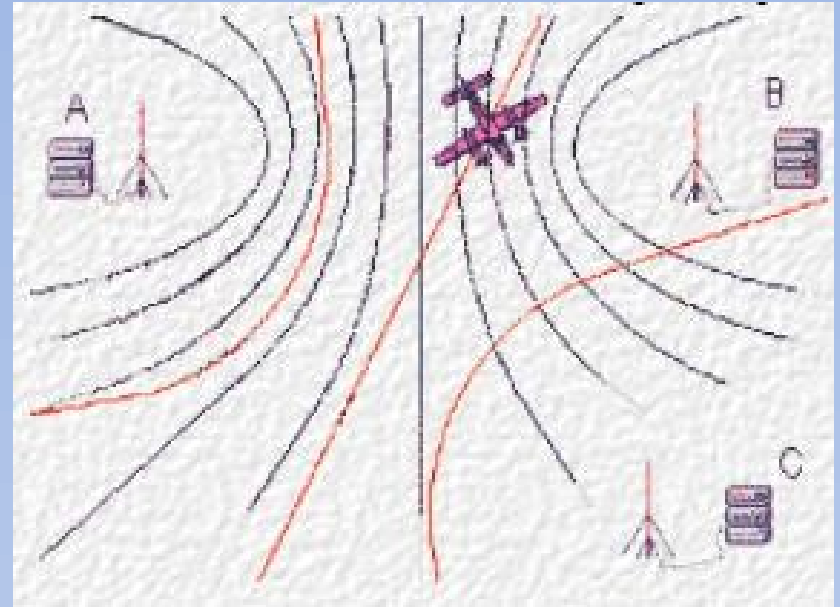
Linia stałej różnicy czasu = 800 mikrosekund.

Dokładność określania położenia jest najlepsza w bezpośrednim sąsiedztwie linii bazowej łączącej obie stacje. Dla zapewnienia właściwej dokładności na większych dystansach wymagana jest doskonała synchronizacja pracy radiolatarni i dobra rozdzielczość aparatury odbiorczej.

1942

System nawigacji hiperbolicznej

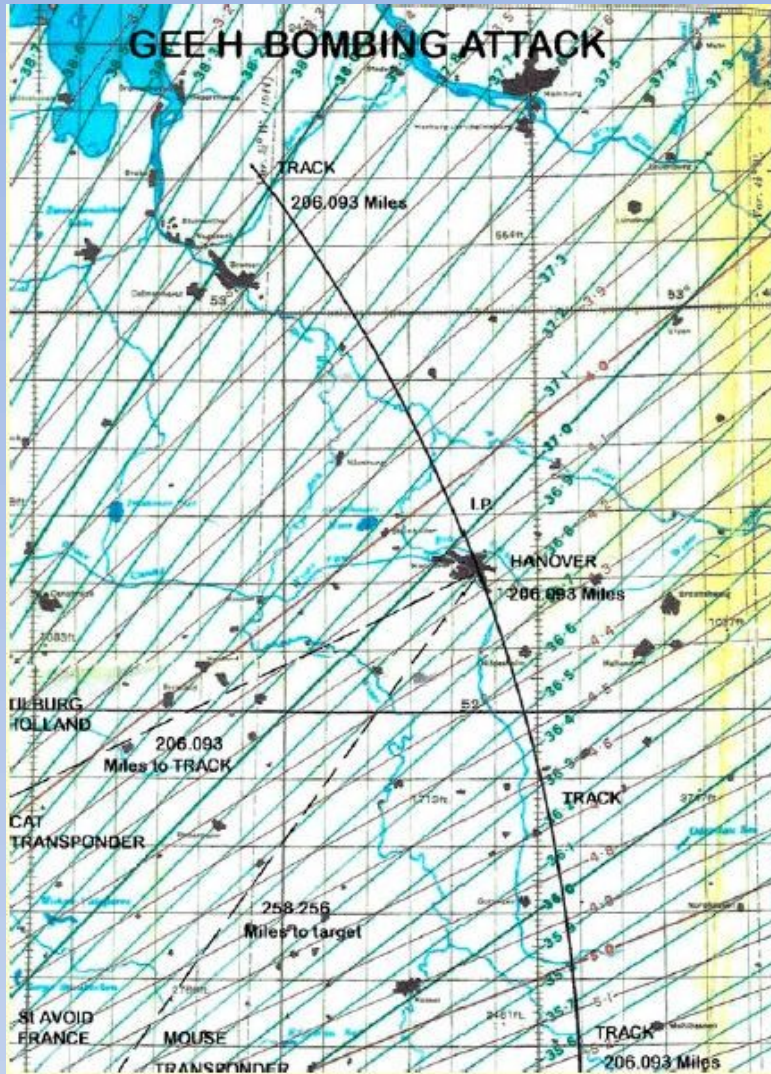
Na podstawie odbioru sygnałów nowej pary radiolatarni wyznacza następną hiperbolę pozycyjną. Przecięcie obu hiperbol ustala dokładną pozycję.



Pomysł nawigacji hiperbolicznej w WB powstał w 1937 roku (Robert Dippy) i dotyczył wspomaganie lądowania bez widoczności. Idea odżyła w 1940 roku w wyniku słabych efektów nalotów RAF na Niemcy. System nazwano *Gee* od pierwszej litery słowa *grid* - siatka.

1942

System nawigacji hiperbolicznej



Do prowadzenia nawigacji hiperbolicznej służyły specjalne mapy z wykreślonymi rodzinami hiperbol dla każdej pary radiolatarni w łańcuchu.

1942

System nawigacji hiperbolicznej



Nadajnik

Odbiornik



GEE - THE AIRCRAFT COMPONENTS

These are the three major components of the GEE system fitted to the bomber aircraft.

The major advantages of the system were that the aircraft did not have to transmit to use it and that any number of aircraft could use the system at the same time.

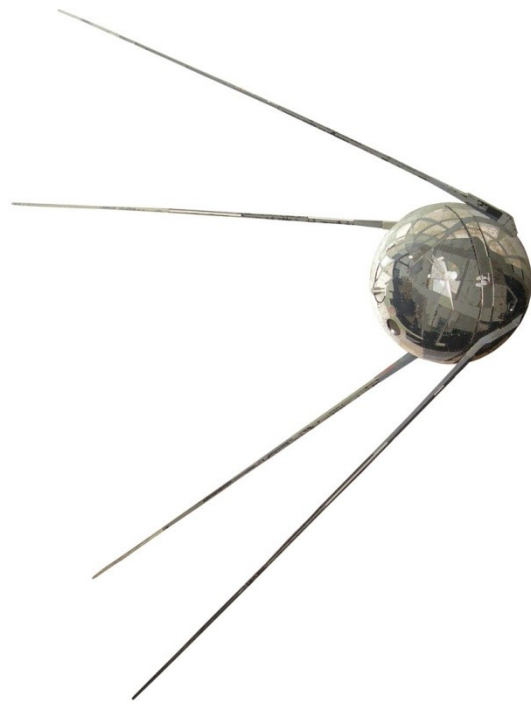
1943

System Oboe



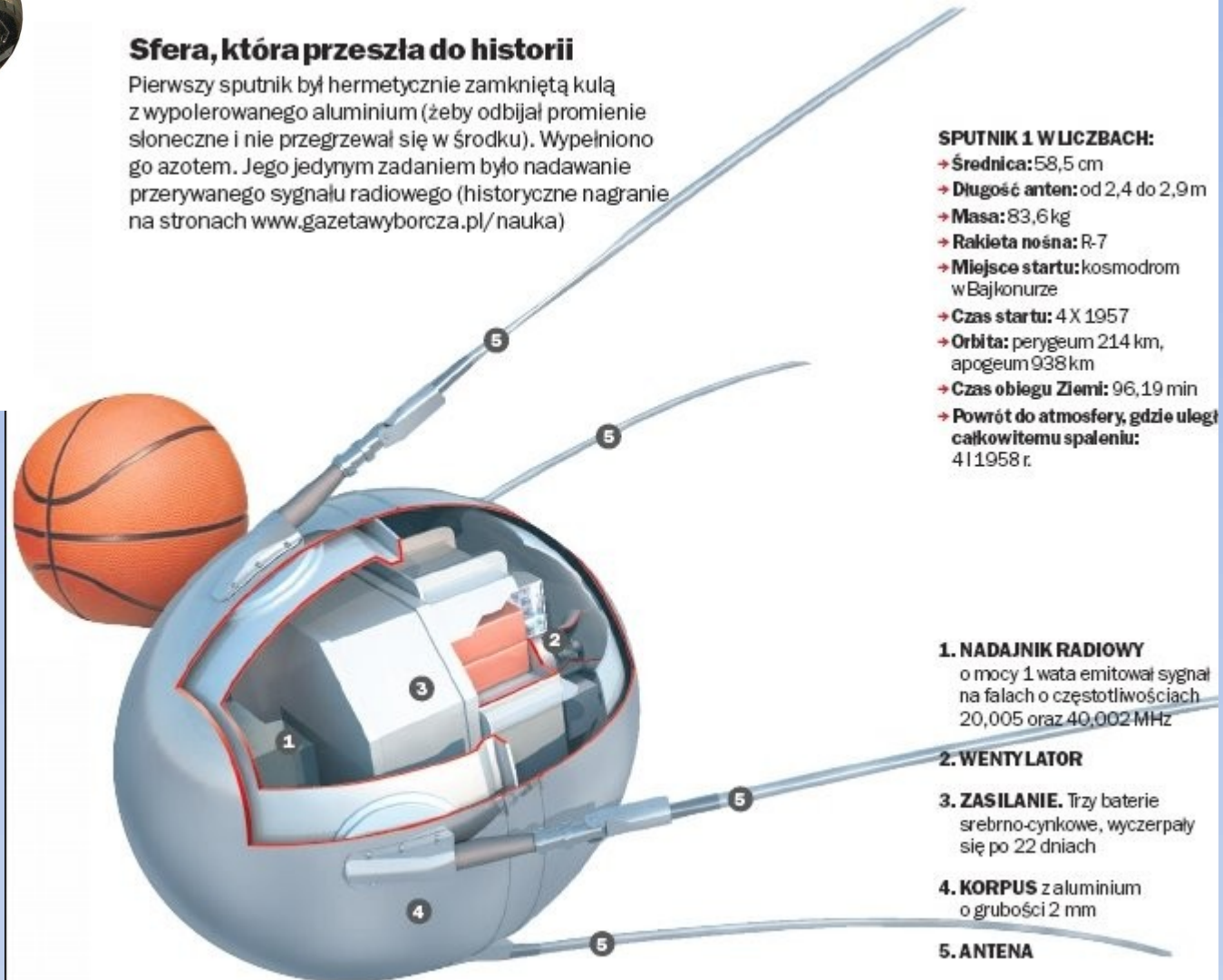
Brytyjski system naprowadzania bombowców dający większą niż Gee precyzję ataków. Samoloty miały transpondery i latały po okręgu w stałej odległości od stacji kota. Bomby były zrzucone po osiągnięciu odpowiedniej odległości od stacji myszy.

Sputnik 1 (1957)



Sfera, która przeszła do historii

Pierwszy sputnik był hermetycznie zamkniętą kulą z wypolerowanego aluminium (żeby odbijał promienie słoneczne i nie przegrzewał się w środku). Wypełniono go azotem. Jego jedynym zadaniem było nadawanie przerywanego sygnału radiowego (historyczne nagranie na stronach www.gazetawyborcza.pl/nauka)



SPUTNIK 1 W LICZBACH:

- **Średnica:** 58,5 cm
- **Diługość anten:** od 2,4 do 2,9 m
- **Masa:** 83,6 kg
- **Rakieta nośna:** R-7
- **Miejsce startu:** kosmodrom w Bajkonurze
- **Czas startu:** 4 X 1957
- **Orbita:** perygeum 214 km, apogeum 938 km
- **Czas obiegu Ziemi:** 96,19 min
- **Powrót do atmosfery, gdzie uległ całkowitemu spaleni:** 4 I 1958 r.

1. NADAJNIK RADIOWY
o mocy 1 wata emitował sygnał na falach o częstotliwościach 20,005 oraz 40,002 MHz

2. WENTYLATOR

3. ZASILANIE. Trzy baterie srebrno-cynkowe, wyczerpały się po 22 dniach

4. KORPUS z aluminium o grubości 2 mm

5. ANTENA

Sputnik 1 (1957)



Masa Sputnika 1 wynosiła 83,46 kg, średnica 58 cm a jego wyposażenie stanowiły dwa nadajniki radiowe. Początkowo obiegał on Ziemię 15 razy na dobę, poruszając się średnio 587km nad ziemią z prędkością 7,57km/sek. Apogeum czyli najwyższym punktem jego orbity była niebagatelna wysokość 962 km, zaś perigeum czyli najbliższą odległością na jaką zbliżał się do Ziemi w swym obiegowym locie było 212 km. Sputnik posiadał dwie pary anten o długości 2,4m i 2,9m i nadajniki o mocy 1 W działające naprzemiennie na fali 7,5m i 15m. Nadawany przez niego sygnał mogli odbierać radioamatorzy w wielu miejscach na Ziemi.

