

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija

Seminarski rad iz kolegija Sustavi za praćenje i vođenje procesa

Ak. god. 2005/06.

Sustavi za detekciju tsunami

Nataša Rogulja

Zagreb, 2006.

Sadržaj:

1.	Uvod	2
2.	Osnovni pojmovi	5
	<input type="checkbox"/> ESA (engl. European Space Agency)	5
	<input type="checkbox"/> ESTEC (engl. European Space Research and Technology Centre)	5
	<input type="checkbox"/> Satelitska komunikacija (engl. Sattelite Communications)	5
	<input type="checkbox"/> GPS (engl. Global Positioning System)	5
	• Svemirski segment	6
	• Kontrolni segment.....	7
	• Korisnički segment	7
	• PRINCIP RADA.....	7
	<input type="checkbox"/> GNSS (engl. Global Navigation Satllite System)	9
	<input type="checkbox"/> GOES (engl. Geostationary Operational Environmental Satellites)	9
	<input type="checkbox"/> GPS-bova (engl. GPS-buoys)	9
	<input type="checkbox"/> Satelitska oceanografija → Wide-swath altimeter	10
	<input type="checkbox"/> Satelitski visinomjer (altimetar)	12
	<input type="checkbox"/> Akustični modem (engl. acosutic modem)	14
3.	Razvoj sustava za detekciju tsunamia	16
	<input type="checkbox"/> Osnovna ideja	16
	<input type="checkbox"/> U.S. koncept	16
	• DART II sustav	17
	<input type="checkbox"/> Prototip (1995)	24
	<input type="checkbox"/> Pariški koncept (engl. Paris Concept)	26
4.	Literatura	30

1. Uvod

Tsunami je prirodni fenomen koji nastaje kao posljedica kretanja litosfernih ploča, jakih podmorskih vulkanskih erupcija, podmorskih urušavanja, kliženja dna golemih razmjera, te pada meteorita na morskú površinu.



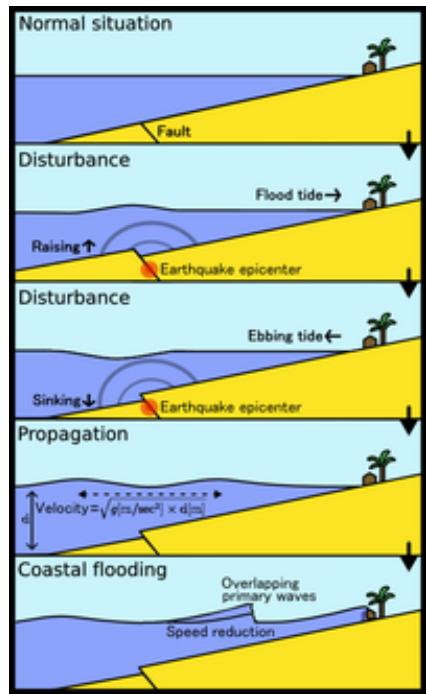
Sl.1. Snimka tsunamia

Riječ **tsunami** na japanskom jeziku označava "**velik lučki val**". Značenje izravno dolazi iz japanskog, budući da je Japan potresima vrlo ugrožena zemlja što ju čini jednom od potencijalnih žrtava mogućih tsunamia. Prirodni fenomeni kao što su vulkani, potresi i gejziri pojavljuju se na mjestima kontakta dvaju litosfernih ploča. Postoje tri osnovna tipa granica litosfernih ploča: *konstruktivne*, gdje se litosferne ploče razmiču (npr. središnji dio Atlantskog oceana), *destruktivne*, gdje se jedna litosferna ploča podvlači pod drugu (uz zapadnu obalu Južne Amerike gdje se Nazca litosferna ploča podvlači pod Južnoameričku ploču) i *konzervativne* gdje dolazi do horizontalnog pomaka litosfernih ploča (npr. Kalifornija, gdje su u kontaktu Pacifička i Sjevernoamerička litosferna ploča). Na slijedećoj slici prikazan je način nastajanja tsunamia u slučaju da u podmorju dođe do određenih poremećaja – potres kao posljedica pomicanja litosfernih ploča. U tom području jedna ploča se brzinom od samo 6 cm godišnje podvlači pod drugu litosfernu ploču, te podvlačenjem "tone" u astenosferu i tali se na velikoj dubini. Podvlačenjem nastaje dubokomorski jarak koji se nalazi zapadno od epicentra potresa. Oslobođena energija prenosi se na morskú vodu, nastaje val čija visina raste, a brzina doseže do 800 km/h. Tsunami postaje opasan tek kada naiđe na obalu gdje se naglo smanjuje vačna

duljina, a povećava valna visina, pa poput vakuma sve povlači za sobom. Dakle, od izvora nastanka poremećaja, tsunamiji putuju brzinom od 500 do 1000 km/h . Dok putuju oceanom mjerena visina im je do 1 m , ali prilikom približavanja obalnom pojasu visina im poraste do nekoliko metara, a brzina im se naglo smanji na nekoliko km/h . Energija te vodene mase je ogromna.

Tsunami može uzrokovati samo manje poplave na mjestima koja su pod njegovim udarom, ali se može pojaviti i kao vertikalni val visok do nekoliko metara i prouzročiti štete katasrtofalnih razmjera. Kakav će razoran efekt biti, ovisi o veličini i periodu pojavljuvanja valova, obalnoj liniji, itd. Iako se tsunamiji kao prirodne katastrofe relativno rijetko pojavljuju, njih 85 % događa se na Pacifiku. Praćenje i detekcija tsunamija je komplikirano, te zahtijeva dobru suradnju znanstvene zajednice i međunarodnu suradnju tsunamijem ugroženih zemalja. Tsunamiji uzrokovani potresima 1960 god.

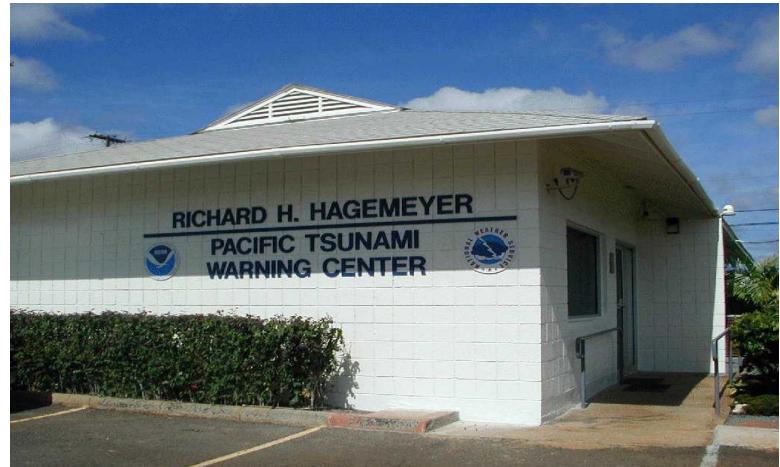
(južnoistočni Pacific) i 1964 god. (sjevernoistočni Pacific) odnijeli su veliki broj ljudskih života i načinili štetu od nekoliko milijuna američkih dolara u najmanje četiri zemlje. Ove katastrofe pokrenule se razvoj prvih sustava za uzbunu - **Tsunami Warning System (TWS)** u Pacifiku 1965 godine pod vodstvom IOC-a (engl. *Intergovernmental Oceanographic Commission*) i američkog regionalnog centra PTWC-a (engl. *Pacific Tsunami Warning Center*) smještenog u Honolulu na Hawajima. Centar je bio u mogućnosti upozoriti na nadolazeći potencijalno razarajući tsunami i informirati o periodu dolaska udarnog vala na razne lokacije. Tadašnjem funkcioniranju TWS-a i poboljšanju rada pridonjeli su centri iz Čile-a, Francuske, Japana, USA-a, te Ruske Federacije. Danas, gotovo svi pacifički otoci imaju seizmičke službe za nadgledanje i predviđanje, među kojima je najuspješnija već navedena ona na Hawajima. Iste godine IOC je osnovao ICG/ITSU (engl. *International Co-ordination Group for the Tsunami Warning System in the Pacific*) koji se je sastajao svake dvije godine u svrhu koordiniranja aktivnosti i poboljšanja sustava. No, u slučaju poslijednjeg tsunamia to nije imalo koristi, jer su uglavnom sve države južne Azije izuzetno siromašne i nemaju *warning system*.



Tsunami indijskog oceana koji je udario u nedjelju, 26. prosinca 2004 godine, odnio je preko 250 000 ljudskih života, uzrokovao milijarde američkih dolara štete u bilo kojem aspektu i sveukupno pogodio 11 država. Geolozi su prije tog katastrofalnog potresa poslijednji puta zabilježili potres magnitude 9 prema Richterovoj ljestvici 1960 godine u

Čile-u. Tsunami koji je udario 2004 godine, posljedica je potresa čiji je epicentar zabilježen oko 250 km sjeveroistočno od indonezijskog otoka Sumatra. Geografske koordinate te katastrofe započele su na približno 3° N, 96° E, od kuda se val kružno širio prema obalama Šri Lanke, Indonezije, Bangladeša, Tajlanda i ostalih susjednih država Bengalskog zaljeva. Tsunami se je čak osjetio i na obalama Somalije.

Na slici desno prikazan je **Pacific Tsunami Warning Center** (PTWC) na Hawajima, osnovan 1949 godine za detekciju tsunami za većinu pacifičkih zemalja. Glavni zadatak PTWC-a je seizmička detekcija (potresi) pacifičke regije i njihova analiza koja govori da li je rezultat određene seizmičke aktivnosti tsunami. U skladu s tim, centar kontinuirano prati seizmičku aktivnost i razinu mora.



2. Osnovni pojmovi

U uvodnom dijelu opisan je prirodni fenomen tsunami i njegovo nastajanje. Nakon velike katastrofe 2004 godine, svijetu se je dalo do znanja da je itekako potreban efikasan sustav za detekciju i uzbunu i to ne samo za pacifičke zemlje već za sve ugrožene regije u svijetu, uključujući obje strane Atlanskog oceana, Mediteran, Karipsko more i Crno more u Indijskom oceanu. Mnoge zemlje već su se uključile u razvoj takvog sustava.

Dalje u tekstu biti će objašnjeni osnovni pojmovi koji se tiču područja satelitske komunikacije i njezine primjene, što je potrebno radi lakšeg razumijevanja principa rada sustava za detekciju tsunamia (U.S.-ov i Pariški koncept).

- **ESA (engl. European Space Agency)**

Europska svemirska agencija osnovana 20. ožujka 1964 godine.

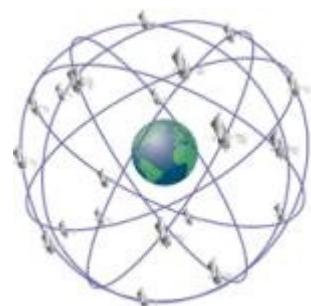
- **ESTEC (engl. European Space Research and Technology Centre)**

- **Satelitska komunikacija (engl. Satellite Communications)**

Kod komunikacije s geostacionarnim satelitima, signal poruka se emitira iz zemaljske stanice prema nadređenom čvoru do satelita. Kada satelit primi odašiljani signal, dodatno ga pojačava i signal se tada odašilje prema drugoj Zemaljskoj stanici. Kod satelitskih komunikacija koristi se frekvencijski pojas od 6 GHz (engl. C-band) za slanje signala do satelita i pojas od 4 GHz prilikom odašiljanja signala prema Zemaljskoj stanici.

- **GPS (engl. Global Positioning System)**

To je mreža satelita koja kontinuirano odašilje kodirane informacije s pomoću kojih je omogućeno precizno određivanje položaja na Zemlji. GPS se temelji na skupini satelita Ministarstva obrane SAD-a koji stalno kruže oko Zemlje. Sateliti odašilju radio signale preko kojih GPS-prijamnik određuje svoj položaj na Zemlji. GPS ima razne primjene na kopnu, moru i u zraku. U osnovi, omogućuje da se zabilježe položaji točaka na Zemlji i ‘uspostavi’ navigacija do tih točaka i od njih. Upotrebljava se na svim



mjestima osim na onima gdje je nemoguće primiti signal – unutrašnjost zgrada, podzemne lokacije, ispod površine vode, itd. Najčešće primjene su: navigacija u zrakoplovstvu, navigacija za nautičare, primjena na tlu zbog mogućnosti preciznog mjerjenja vremena, itd. Geodeti upotrebljavaju GPS kako bi povećali opseg rada, jer sustav nudi veliku uštedu smanjenjem vremena potrebnog za geodetsku izmjeru. Također, sustav daje veliku točnost. GPS-prijamnici mogu dati točnost bolju od jednog metra, a skuplji sustavi točnost reda veličine centimetra.

GPS se sve više ‘koristi’ i u automobilima. Postoje različiti sustavi – položaj vozila na elektroničkoj karti dajući vozačima mogućnost da obilježe svoje položaje i potraže određenu adresu; sustavi automatski kreiraju trasu (rutu) i daju upute za svako skretanje do traženog položaja.

NAVSTAR (engl. *Navigation Satellite Timing and Ranging*) je službeno ime Ministarstva obrane SAD-a za GPS. NAVSTAR se sastoji od **svemirskog segmenta** (sateliti), **kontrolnog segmenta** (zemaljska stanica) i **korisničkog segmenta** (korisnici i njihovi GPS-prijamnici) .

- **Svemirski segment** – sastoji se od barem 24 satelita (21 aktivnih i 3 rezervna) i čini jezgru sustava. Sateliti su u “visokoj orbiti” na oko 20 000 km iznad Zemljine površine. Rad na takvoj visini omogućuje da signali prekriju veće područje. Sateliti su u orbiti pozicionirani na taj način da GPS-prijamnik na Zemlji može uvijek primati signale s barem četiri od satelita. Trenutno ih je aktivno 30. Sateliti putuju brzinom od 11 000 km/h, što znači da obiđu Zemlju svakih 12 sati. Napajaju se solarnom energijom i napravljeni su tako da im je “životni vijek” do 10 godina. Ako dođe do npr. pomrčine i nestanka trenutnog izvora solarne energije, postoje rezervne baterije (engl. *backup system*) koje ih održavaju u pogonu. Sateliti imaju i dodatni mali raketni pogon koji ih održava na pravoj putanji.

Svaki satelit emitira radio signale male snage na nekoliko frekvencija (označene su s L1, L2 itd.). Civilni GPS-prijamnici primaju signale (“slušaju”) na frekvenciji **L1** od 1575,42 MHz UHF-pojsa. Signal putuje kao zraka svjetlosti, što znači da prolazi kroz oblake, staklo i plastiku, ali ne prolazi kroz razne čvrste objekte – zgrade, planine. L1 sadrži dva “*pseudoslučajna*” (engl. *pseudo random*) signala, zaštićeni P-kodom i C/A-kodom. Svaki satelit emitira jedinstveni kod koji omogućuje GPS-prijamniku da identificira signale. Glavna

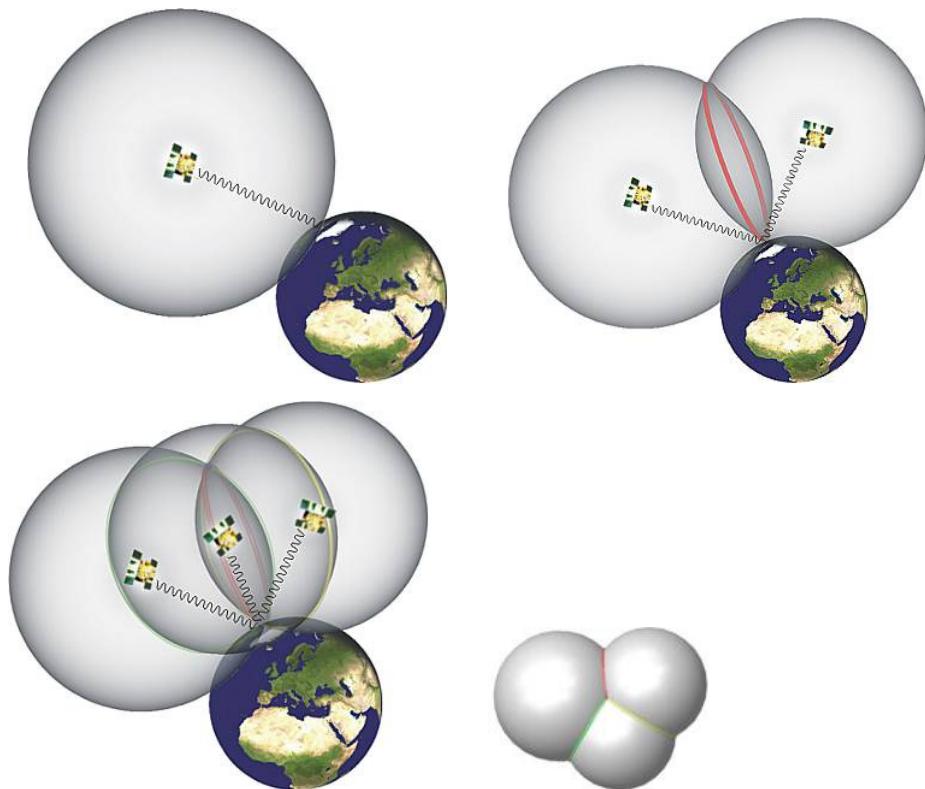
svrha kodiranih signala je da se omogući računanje vremena putovanja signala od satelita do GPS-prijamnika na Zemlji. To se vrijeme također naziva vremenom dolaska. Vrijeme pomnoženo brzinom svjetlosti daje udaljenost od satelita do GPS-prijamnika. Informacija koju satelit šalje prijamniku (navigacijska poruka) sadrži orbitalnu i vremensku informaciju satelita, generalnu sistemsku statusnu poruku i ionosfersku korekciju. Satelitski signali su vremenski upravljeni preciznim atomskim satovima.

- **Kontrolni segment** – “kontrolira” GPS-satelite, tj. upravlja satelitima tako da ih prati i daje ispravljene orbitalne i vremenske informacije. Postoji pet kontrolnih stanica širom svijeta (4 bez ljudi) – služe za nadgledanje i jedna glavna kontrolna stanica. Četiri prijamne stanice neprekidno primaju podatke od satelita i šalju ih glavnoj kontrolnoj stanicu. Glavna kontrolna stanica “ispravlja” satelitske podatke i šalje ih natrag GPS-satelitima.
- **Korisnički segment** – ulaze svi koji upotrebljavaju GPS i njihove prijamnike.
- **PRINCIP RADA** – GPS-prijamnik mora biti “upoznat” s položajem satelita i koliko su udaljeni. GPS-prijamnik od satelita dobiva dvije vrste kodiranih informacija. Prvi tip informacija sadrže približni položaj satelita. Ti se podaci kontinuirano prenose i spremaju u memoriju GPS-prijamnika tako da on zna orbite satelita i gdje bi koji satelit trebao biti. Kako sateliti mijenjaju svoj položaj, podaci se periodički ažuriraju novim informacijama. Svaki satelit ima mogućnost da putuje malo izvan orbite, pa zemaljska stanica za praćenje prati orbite satelita, njihovu visinu, položaj i brzinu. Zemaljska stanica za praćenje šalje orbitalne informacije glavnoj kontrolnoj stanicu, a ona dalje satelitima ispravljene podatke. Ti ispravljeni i egzaktni podaci o položajima nazivaju se “efemeride”, vrijede do šest sati i šalju se GPS-prijamnicima u obliku kodiranih informacija. Druga informacija je udaljenost satelita. Formula pomoću koje se izračuna udaljenost satelita: udaljenost od satelita jednaka je brzini emitiranog signala pomnoženoj s vremenom koje treba da signal dođe do prijamnika (**brzina* vrijeme putovanja = udaljenost**).

Koristeći osnovnu formulu za određivanje udaljenosti, prijamnik već zna brzinu. To je brzina radio valova - oko 300 000 kilometara u sekundi (brzina svjetlosti), s malim kašnjenjem zbog prolaska signala kroz Zemljinu atmosferu. GPS-prijamnik dalje treba odrediti vremenski dio formule. To je sadržano u

kodiranim signalu koji satelit odašilje. Emitirani kod naziva se „*pseudoslučajni kod*” jer sliči signalu šuma. Satelit generira pseudoslučajni kod, a GPS-prijamnik generira isti kod i nastoji ga prilagoditi kodu satelita. Prijamnik tada uspoređuje dva koda da bi odredio koliko treba zaksniti (ili pomaknuti) svoj kod kako bi odgovarao kodu satelita. To vrijeme kašnjenja (pomaka) množi se s brzinom svjetlosti da bi se dobila udaljenost.

Tehnologija GPS-prijamnika – većina je paralelnog višekanalnog dizajna. Stariji jednokanalni prijamnici bili su popularni, ali u najtežim uvjetima nisu bili u stanju stalno primati signal. Paralelni višekanalni prijamnici imaju između 5 i 12 prijamnih krugova, svaki pridružen jednom satelitskom signalu, tako da je moguće održavati dobru vezu sa svakim satelitom. Višekanalni prijamnici se brzo povezuju sa satelitima kad se prvi put uključe i njihove su mogućnosti velike pri primanju signala čak i u teškim uvjetima.



Sl.5.

Slika 5 pokazuje primjer određivanja položaja. Ako su poznati položaji satelita i udaljenosti, prijamnik može odrediti svoj položaj. Ako prepostavimo da smo 18 000 km udaljeni od nekog satelita, naš položaj bit će negdje na zamišljenoj sferi polumjera 18 000 km u čijem središtu je satelit. Dalje prepostavimo da se nalazimo od drugog

satelita na udaljenosti od $19\ 000\ km$. Druga sfera sjeće prvu sferu u zajedničkoj kružnici (**crveno** označeno – druga slika).

Ako se doda treći satelit, na udaljenosti od $20\ 000\ km$, postojat će dvije zajedničke točke u kojima se sijeku sve tri sfere. Iako su moguća dva položaja, **oni se znatno razlikuju po koordinatama.** Da bi se odlučilo koja od dviju zajedničkih točaka daje stvarni položaj, potrebno je unijeti približnu visinu u GPS-prijamnik. To omogućuje prijamniku da izračuna dvodimenzionalni položaj (geografsku širinu i dužinu). Zatim, uz pomoć četvrtog satelita, prijamnik može odrediti i trodimenzionalni položaj (geografsku širinu, dužinu i visinu). Ako pretpostavimo da je udaljenost od četvrtog satelita 17 000 kilometara, četvrta sfera će sjeći prve tri u jednoj zajedničkoj točci.

□ **GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System*)**

GNSS je sustav koji za pozicioniranje koristi NAVSTAR ili GLONASS. GPS je podsustav globalnog satelitskog (navigacijskog) sustava, tj. GNSS-a jer omogućuje samo točno određivanje položaja, dok sam GNSS dodatno uključuje:

- Točno pozicioniranje u stvarnom vremenu za sigurnu navigaciju
- Korisnik mora biti u stanju odrediti točnost navigacije

□ **GOES (engl. *Geostationary Operational Environmental Satellites*)**

Serija satelita GOES američke agencije NOAA i METEOSAT Evropske svemirske agencije predstavljaju niz geostacionarnih satelita postavljenih u orbitu iznad ekvatora. S tih visina njihovi senzori su u mogućnosti skoro potpuno obuhvatiti hemisferu. Od njih se dobivaju točne slike oblačnosti svakih pola sata.

□ **GPS-bova (engl. *GPS-buoys*)**

GPS-buoy je nezavisna stanica za prikupljanje podataka i čini zasebnu platformu koja se po potrebi odvodi na tražene položaje. Električnu snagu za rad sustava osigurava *solar/wind/battery* sustav. Podaci koje prikupi se dalje šalju na obradu radio prijenosom do baznih stanica. Tipična visina je preko 13 m, a težina do 10 t. Kada bazna stanica primi podatke ti se podaci obrađuju zajedno s podacima dobivenim od GPS-prijamnika koji se fiksno nalaze na određenim lokacijama. Nakon obrade signala, utvrđuje se položaj bove koji odgovara poziciji GPS-antene koja se nalazi na vrhu

bove. Kako bi se mogao proučavati odnos između pozicije GPS antene i trenutne razine mora, bova je opremljena dodatnim elektroničkim senzorima:

- vertikalni akcelerometar
- tiltmetar kojim se utvrđuje inklinacija
- meteorološki senzor za detekciju brzine i smjera vjetra

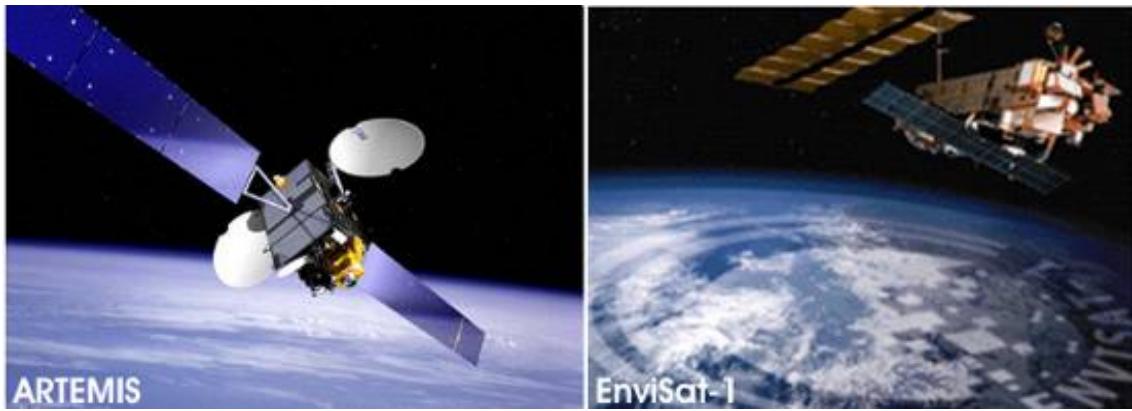
Podaci se prenose radio prijenosom. Kako je brzina prijenosa ograničena na 4800 bps, samo se GPS podaci prenose do bazne stanice (ostali podaci pohranjeni su u elektroničkom sustavu bove).

□ **Satelitska oceanografija → *Wide-swath altimeter***

Satelitska oceanografija razvila se tijekom zadnjih desetljeća prošloga stoljeća. To je područje znanosti koje pokušava rješiti problem vremenskih i prostornih nedostataka oceanografskih podataka. Klasična mjerena svojstava oceana su skupa i zahvaćaju vrlo mala područja. Prednosti satelitske oceanografije su prostorna pokrivenost koja omogućava kontinuirana mjerena stanja svjetskih mora, zatim periodičnost uzorkovanja podataka, mjerena više parametara istovremeno i korištenje jednog instrumenta na cijeloj zemaljskoj kugli (ne postoji problem s kalibracijski uzrokovanim razlikama i sistematskim greškama različitih instrumenata). **Glavni nedostatak satelitske oceanografije** jest pokrivenost samo površine oceana i mora, dok su mjerena svojstava dubljih slojeva nemoguća. Tehnologija satelitskih mjerena je također mnogo skuplja od klasičnih metoda uzorkovanja. Bitniji sateliti koji mogu biti dio sustava za detekciju tsunamia navedeni su u tablici 1.

Satelit	Namjena	Parametri
NOAA sateliti	vrijeme i površinska temperatura	vidljivo i infracrveno zračenje Argos sustav praćenja
SEASAT	more	vidljivo, mikrovalno, difuzno zračenje visinomjer
GPS	navigacija	pozicioniranje
ERS1, ERS2	more i kopno	vidljivo, mikrovalno, difuzno zračenje visinomjer
TOPEX-Poseidon	more	visinomjer
JASON	more	visinomjer

Tab.1. Sateliti i njihove namjene



Sl.6. Shematski prikaz EnviSat-1 i Artemis satelita

Sateliti predstavljaju platformu na koju se postavljaju različiti senzori. Razlikuju se tri skupine satelita ovisno o načinu pozicioniranja iznad Zemlje - kružni sateliti, polarni sateliti (iznad oba pola na visini od oko $800\ km$), te geostacionarni sateliti (na visini od $35\ 800\ km$).

Na satelite se postavljaju odgovarajući senzori koji mjeru pojedine atmosferske i oceanografske parametre. U te senzore ulaze:

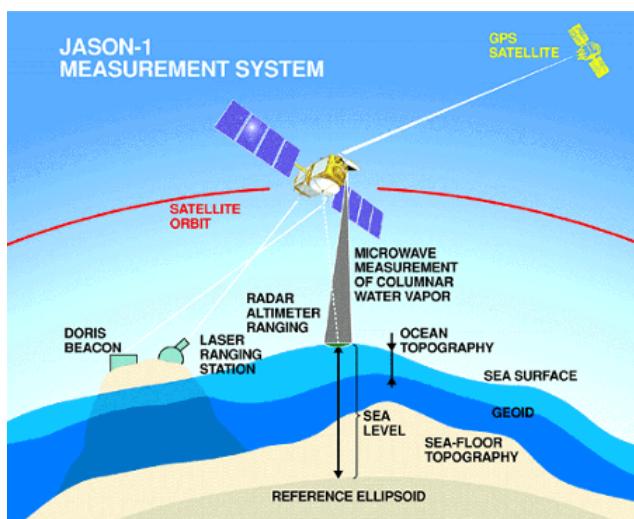
- mikrovalni radiometar – služi za mjerjenje količine vodene pare u stupcu zraka i korekciju podataka visine pomoću visinomjera (altimetra) pri mjerenu topografije oceana i promjene razine mora.
- **radarski visinomjer (altimetar)** – mjeri trajanje puta i intenziteta reflektiranih radio valova. Na taj način određujuće topografiju morske površine, visinu razine mora i brzinu vjetra u atmosferi, te visinu površinskih kratkoperiodičkih valova u oceanima.
- radiometri i spektrometri



Sl.7. Mikrovalni radiometar i radarski visinomjer (altimetar) na satelitu Jason-1

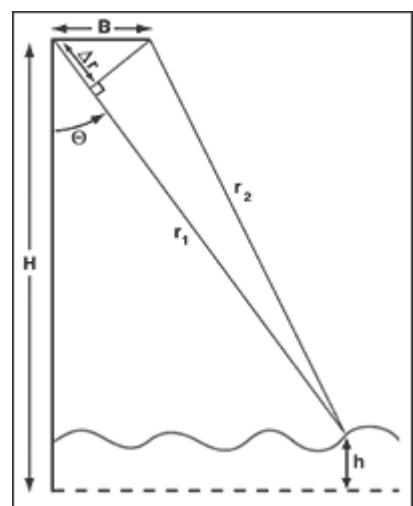
□ Satelitski visinomjer (altimetar)

Satelitski visinomjer mjeri promjene razine mora u prostoru i vremenu s prostornom rezolucijom od 6-7 km i usmjerava snopove zraka prema površini Zemlje prilikom čega mjeri jačinu i trajanje puta odašiljanog i reflektiranog signala. Mjerenje se upotpunjuje s preciznim određivanjem putanje (orbite) satelita, te se na taj način određuje topografija oceana, leda i kopna u odnosu na standardni geodetski elipsoid. Satelitsko određivanje trenutne topografije površine mora odvija se uzduž putanja satelita, koji periodički prelaze preko istih staza, pa se razina računa oduzimanjem trenutne od srednje topografije površine mora.



Sl.8. Primjer – shema rada Jason-1 satelitskog visinomjera

Jednodimenzionalno mjerjenje ne daje potpunu sliku vektorskog polja morskih struja i gravitacijskih nepravilnosti. Kako bi se razina mora mogla prikazati u 2D prostoru, JPL (engl. *Jet Propulsion Laboratory*) je osmislio interreferometrijski radar s kojim bi mjerena trebala dati (prostorna pokrivenost do 200 km) 2D prikaz trenutne razine mora, a ne sam profil morske razine. Novi instrument naziva se *Wide-swath Ocean altimeter* (WSOA). WSOA mjeri relativno kašnjenje između reflektiranih signala s morske površine od međusobno udaljenih antena (dvije) s „baseline distance“. Na slici desno prikazana je geometrijska interpretacija WSOA-a. Slika prikazuje nekoliko bitnih parametara: „baseline distance“ – B i udaljenosti od promatranog položaja do anetna



r_1 i r_2 . Udaljenost B je poznata iz same konstrukcije, udaljenost r_1 određuje se pomoću sustava, a udaljenost između r_1 i r_2 preko fazne razlike θ dvaju signala i ona iznosi

$$\theta = 2 \cdot \pi \cdot \Delta r / \lambda \quad (1)$$

gdje je λ valna duljina (radara). Trokut sa slike daje nam odnos između tih veličina:

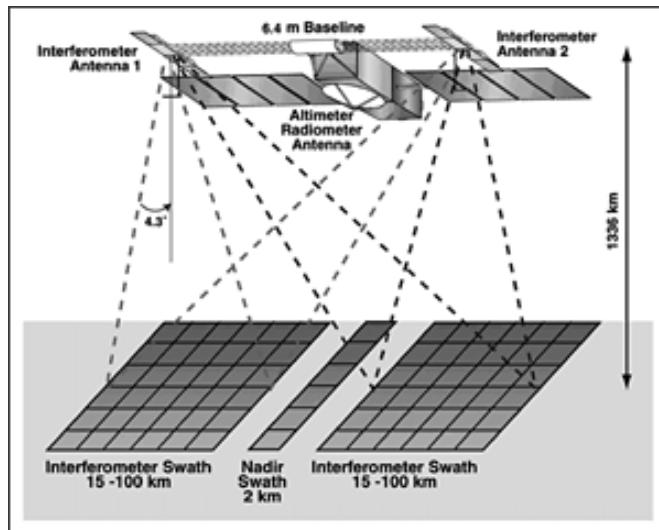
$$\Phi = 2 \cdot \pi \cdot B \cdot \sin(\theta) / \lambda \quad (2)$$

Prema tim mjeranjima, visina h dobiva se iz slijedeće jednadžbe

$$h = H - r_1 \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

gdje je H visina na kojoj se nalazi satelit.

Slika 10 prikazuje predloženu JPL strukturu OSTM/Jason-2 satelitskog visinomjera.



Sl.10.

□ Akustični modem (*engl. acousutic modem*)

Uređaj za bežičnu komunikaciju, koristi se za prijenos podataka i informacija kroz voden medij (ocean). Akustični modem pretvara digitalne signale u određene (podvodne) zvučne signale. Te signale prima drugi akustični modem i vrši pretvorbu natrag u digitalni podatak. Ti modemi se često koriste za podvodni prijenos i telemetriju podataka, podvodno praćenje i pohranjivanje specifičnih podataka i sve ostalo vezano uz podvodnu bežičnu komunikaciju. Na slici 11 prikazan je jedan od modela akustičnih modema – UWM3000, koji zadovoljava određene specifikacije:

- S pomoću dva akustična modema moguće je uspostaviti transparentnu bežičnu RS-232 vezu.
- Nije potrebna modifikacija software-a.
- Predstavlja visoko razvijenu digitalnu tehnologiju, omogućuje velike brzine prijenosa podataka.
- Prisutna DSP (*engl. digital signal processing*) tehnologija.
- Vrlo sofisticiran komunikacijski protokol.
- Manja cijena, lako održavanje, bolja pouzdanost sustava u odnosu na uobičajeni komunikacijski sustav (modemi).
- Prisutna akustična širokopojasna spread spectrum modulacija (*engl. acoustic broadband spread spectrum modulation*).
- Vrlo velika pouzdanost prijenosa podataka.
- Automatska prilagodba brzine rada.
 - Podaci za UWM3000:
 - RS-232 – brzina prijenosa do 2500 bits/second
 - Akustična veza – 5000 bits/second
 - Bit error rate (BER), vjerojatnost pogreške detekcije bita $< 10^{-7}$
 - Potrošnja u transmit modu (odašiljanje): 3 do 12 W
 - Potrošnja u receive modu (primanje): 0.8 W
 - Potrošnja u sleep modu: 8 mW
 - Frekvencija rada uređaja: 7.5 do 12.5 KHz
 - Mogući rad do 3000 m udaljenosti
 - Moguća max. dubina: 700, 3000 ili 6000 m
 - Napajanje: 18-28 V
 - Optimalna brzina prijenosa podataka: 5000 bauda

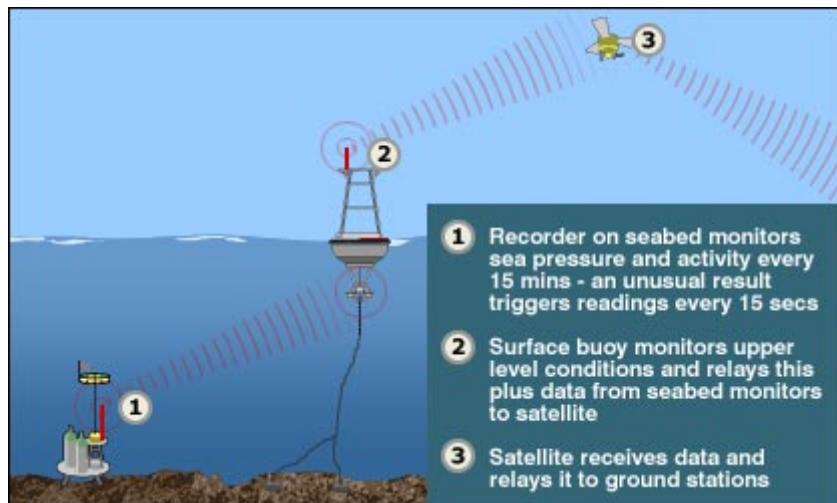


Sl. 11. Jedan od modela akustičnih modema – UWM3000

3. Razvoj sustava za detekciju tsunamia

□ Osnovna ideja

Osnovna ideja sustava za detekciju tsunamia prikazana je na slici 12. Slika prikazuje BPR sustav - podvodno mjerjenje tlaka svakih 15 minuta prilikom čega bilo koje mjerjenje koje odstupa od predviđenih normalnih (normalno → nema tsunamia) vrijednosti prebacuje sustav u “**Event Mode**”. Bova (plutača) koja se nalazi na morskoj površini i prima podatke pomoću akustičnog modema od BPR-a odašilje dobivene podatke o mogućoj prisutnosti tsunamia satelitu. Satelit primljene signale odašilje zemljanim stanicama (GPS-prijamnici) čija uloga je analiza prikupljenih informacija i moguća uzbuna regija o nadolazećem tsunami.



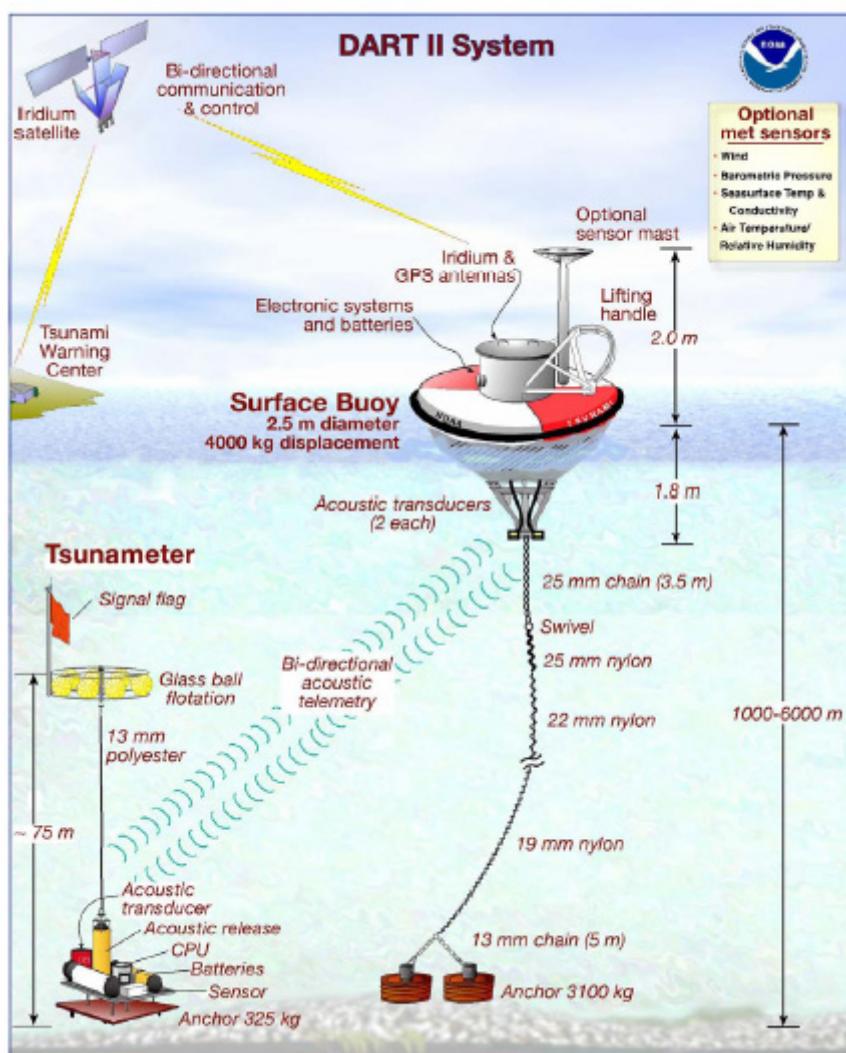
Slika 12.

□ U.S. koncept

Kao dio U.S.-ovog NTHMP-a (engl. *National Tsunami Hazard Mitigation Program*), DART projekt (engl. *Deep Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*) je u nastojanju da poboljša sposobnost pravovremene detekcije tsunamia u real-time-u (u stvarnom vremenu) na otvorenom oceanu. Prema NOAA-inim planovima, DART stanice su postavljene u regijama koje su poznate po ugroženosti od tsunamia kako bi osigurale pravovremenu detekciju tsunamia i prikupile kritične podatke.

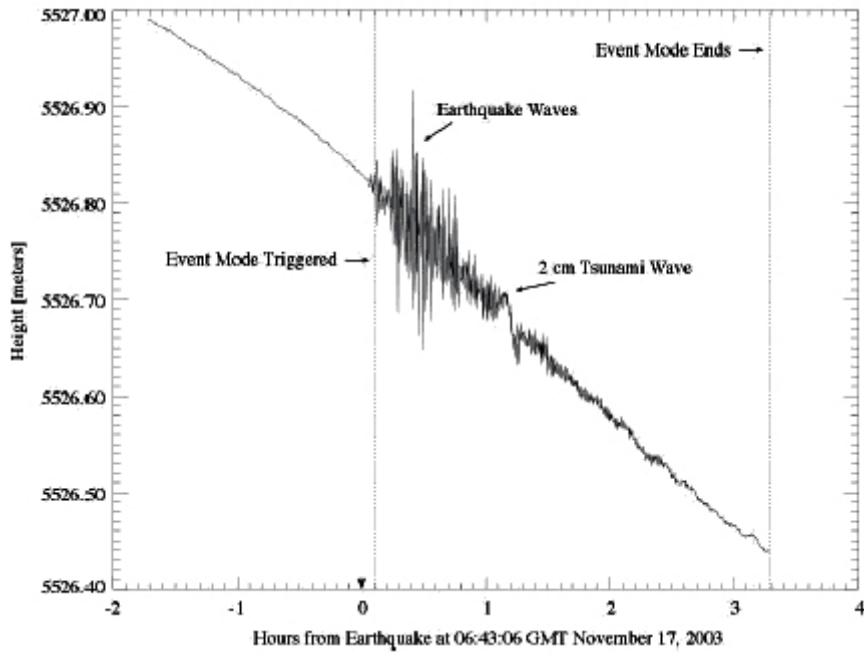
- **DART II sustav**

Razvoj sustava za detekciju tsunamia pod vodstvom NOAA/PMEL temelji se na integraciji mjerjenja u real-time-u ('stvarnom vremenu') i digitalnoj tehnologiji. DART II sustav prikazan na slici 13. Sastoji se od dvije komponente: tsunametra na dnu oceana i bove na morskoj površini.



Sl.13. DART II sustav

Valovi koji čine tsunami mogu se protezati do nekoliko stotina kilometara i smatra ih se plitkim morskim valovima. Visina im poraste kada se pojave u područjima gdje morska dubina naglo opada. Prema fizikalnom efektu kojeg je proučio George Stokes 1847 godine, duboki ocean se ponaša kao idealni NP filter i dopušta tsunamijima, te ostalim prirodnim pojavama dužeg perioda da budu detektirane jednostavnim mjerenjem tlaka na fiksnoj točci podmorja. Potresni valovi prikazani na slici 14 rezultat su promatranja tsunamia s podvodnim senzorima tlaka.

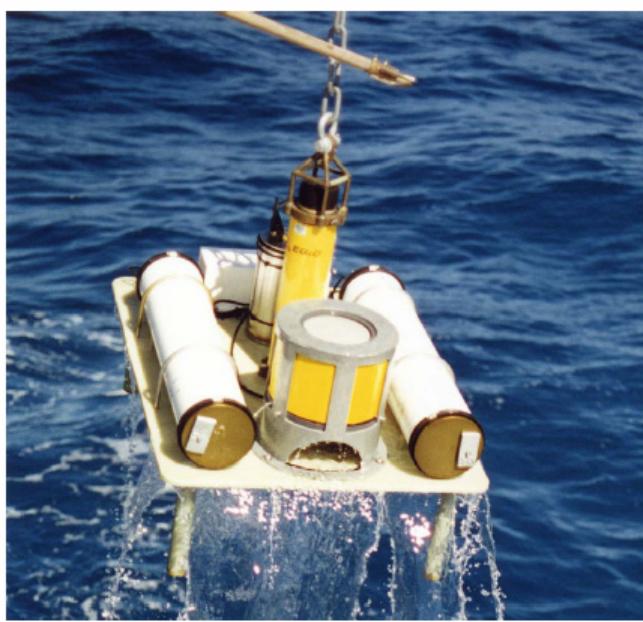


Sl.14. Tsunami, 2003 godina, mjereno tsunametrom,
na 50° N, 171° W

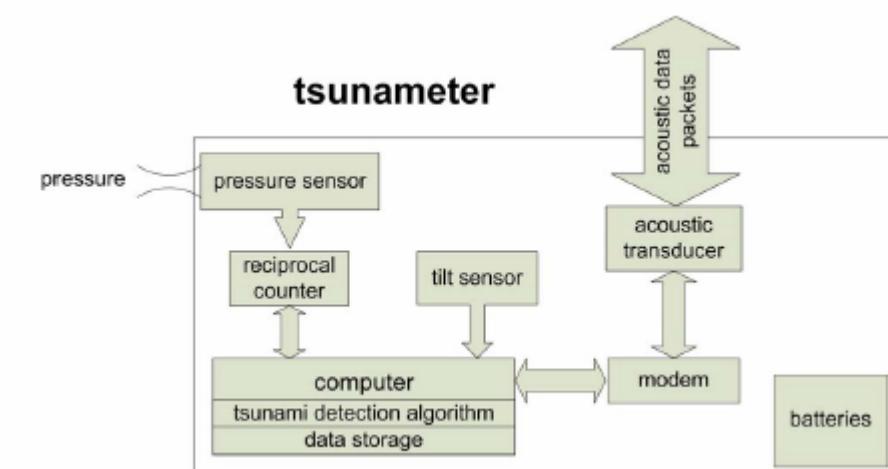
Valovi uzrokovani potresom putuju znatno većim brzinama nego tsunami valovi i često prebace tsunameter u "Event Mode" (način rada koji definira da je detektiran tsunami) prije dolaska samog tsunamija. Vertikalno pomicanje morskoga dna (potres) rezultira podizanjem morske razine ili kompresije volumena vode iznad samog poremećaja i time dolazi do porasta tlaka kako dolazi do pada morskoga dna. Karakteristike DART II sustava:

- Pouzdanost sustava i brzina dohvata informacija: > 80%
- Maksimalna dubina rada: 6000 m
- Minimalno vrijeme rada sustava: više od 1 godinu
- Period uzorkovanja detektiranih signala: 15 s
- Period uzorkovanja, prijenos podataka (izvještaj): 15 i 60 s
- Period uzorkovanja, prijenos podataka (izvještaj) o padu i porastu morske razine: 15 min
- Osjetljivost mjerjenja: < 1mm na 6000 m; $2 \cdot 10^{-7}$
- Izvještaj o prvoj detekciji tsunamija: automatski pomoću algoritma za detekciju tsunamija
- Kašnjenje pri prijenosu podataka (izvještaj): manje od 3 min

Tsunametar



Na slici 15 prikazan je sustav koji se naziva tsunametar i ima ulogu senzoriranja tlaka, praćenja i obrade signala, pohranjivanja podataka, te prijenosa podataka pomoću akustičnog modema. Računalo prikazano na slici sadrži podatke o tlaku dobivenih pomoći senzora. Na te podatke se u računalu primjenjuje algoritam za detekciju tsunami. Razni podaci i komande se odašiljavaju i primaju prema i od bove putem akustičnog modema. Akustični pretvornik s kristalom kvarca oscilira na niskoj rezonantnoj frekvenciji. Taj oscilator pričvršćen je na Bourdon-ovu cijev koja je s jednom svojom stranom otvorena u vodi. Senzor tlaka daje dva signala pravokutnog oblika moduliranih frekvencija. Ti signali proporcionalni su trenutnom mjerenuom tlaku i temperaturi.



Sl.15.

Brojilo i Računalo:

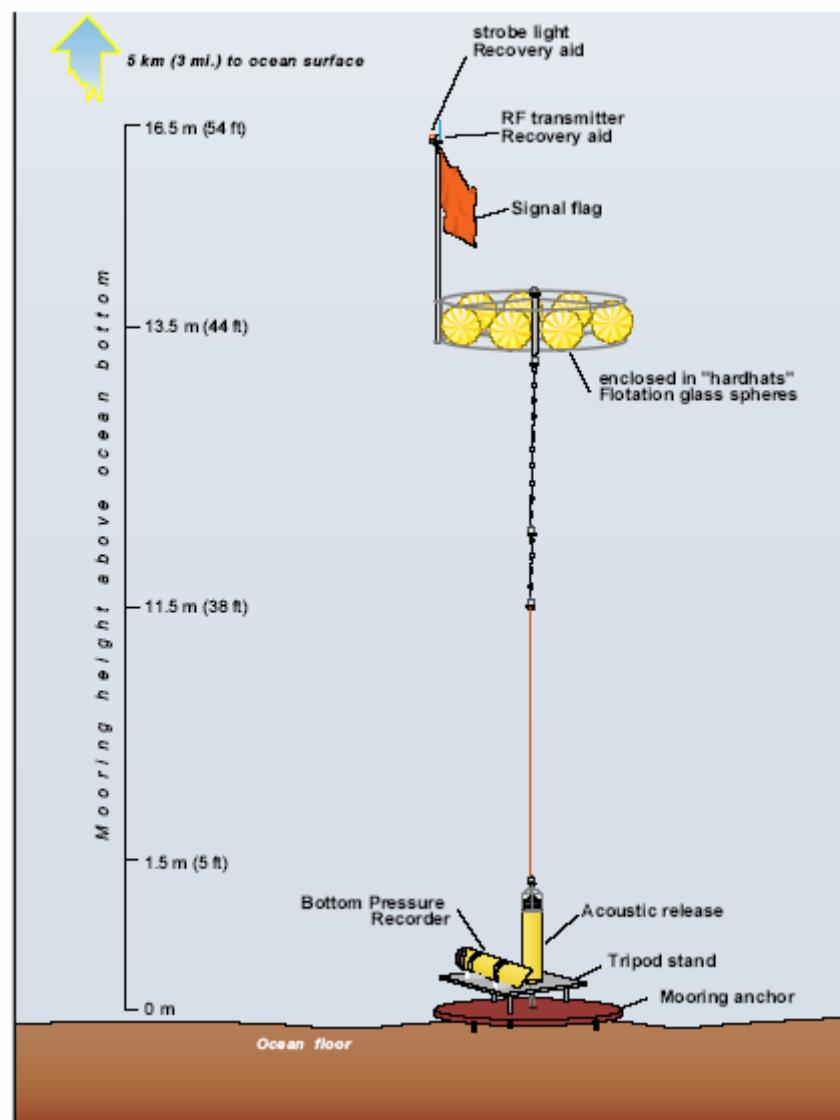
Period uzorkovanja od 15 sekundi koji je određen brojilom uzorkuje signale koje detektira senzor. Frekvencija rada brojila je oko 2.097152 MHz (frekvenciju određuje već navedeni oscilator). Između svakog perioda nema 'mrtvog' perioda, već postoji kontinuirano mjerjenje i uzorkovanje signala. Na kraju svakog perioda, mikrokontroler dobiva podatke o tlaku i temperaturi i pohranjuje ih u flash memoriju. Tih 15 sekundi, godišnje ukupno čini oko 18 Mb podataka. 'Računalo' koje se nalazi u računalnom sustavu u bovi i tsunametu je 32-bitni, Motorola 68332 mikrokontroler, radi na 3.3 V i programiran je u C programskom jeziku. Ima 4 Mb flash memorije, 12-bitni A/D konvertor s osam ulaza, dva priključka za RS-232 vezu, hardware "watch-dog" sklop za detekciju pogrešnog rada (ako program upadne u neregularnu petlju prilikom svoga rada unutar nekog fiksnog određenog vremena T i time ne inicijalizira "watch-dog" sklop, sam "watch-dog" će resetirati mikrokontroler), 512 byte-ova RAM-a. Obavlja osnovne funkcije: digitalno obrađuje podatke pri čemu kontinuirano pokreće algoritam za detekciju tsunamia, pohranjuje podatke o razini mora i ima automatsko prebacivanje iz jednog načina rada u drugi (Standard mode; Event mode).

Akustična komunikacija:

Benthos ATM-880 Telesonar akustični modem s AT-421LF pretvornikom ima koničnu zraku pod 40° kojom se prenose podaci između tsunametra i bove na površini. Modem prenosi digitalne podatke i koristi MFSK modulaciju prilikom čega se moduliraju zvučni signali (moguća redundacija i kodiranje). Uloga pretvornika je da minimizira utjecaj pozadinskog šuma. Akustični modemi rade unutar frekvencijskog pojasa od 9-14 KHz, pri brzini od 600 bauda i koriste MFSK modulaciju. Komunikacijski sustav koristi modificirani x-modem protokol koji u velikoj mjeri smanjuje potrošnju i efikasno podržava prijenos velike količine podataka. Cijeli se paketi podataka šalju bez zahtijeva o potvrdi prijema od strane prijemnika nakon svakog bloka podatka. Ako neki blokovi podataka nedostaju, zahtijeva se njihovo ponovno slanje. Ako sistem nije u stanju uspostaviti vezu, nova veza pokušava se uspostaviti maksimalno dva puta.

Algoritam za detekciju i način rada:

Podvodno mjerjenje tlaka (BPR - engl. *bottom pressure recorder*) i bova na morskoj površini čine real-time sustav za detekciju tsunamia. BPR prati tlak vode s rezolucijom oko 1 mm u razmacima od svakih 15 sekundi. Podaci se prenose iz BPR-a akustičnim modemom do GPS-bove koja dalje podatke šalje GPS-prijamnicima na digitalnu obradu signala. Pod normalnim uvjetima (nema tsunamia) BPR satno šalje podatke što obuhvaća četiri 15-minutne vrijednosti. BPR može pokušati ukupno 2 puta ponovno uspostaviti vezu s bovom. Na slici 16 prikazana je BPR konfiguracija.



Sl.16. BPR konfiguracija

Algoritam (za detekciju) BPR-a generira procijenjene vrijednosti amplituda signala koji prikazuje fluktuacije tlaka. Te predviđene vrijednosti prilagođene su vrijednostima amplituda signala fluktuacija tlaka niskih frekvencija (nalaze se u frekvencijskom pojasu tsunamia). Vrijednosti se procjenjuju svakih 15 sekundi, koliko i traje period uzorkovanja signala. Ako nove zabilježene vrijednosti amplituda signala uspoređene s predviđenim pređu određeni prag (npr. prag za Sjeverni Pacifik iznosi 30 mm), tsunametar prelazi u “**Event Mode**”. Tsunametar radi u dva načina rada: “**Standard Mode**” (pri prijenosu podataka) i “**Event Mode**” (prilikom detekcije nenormalne vrijednosti tlaka – prisutnost tsunamia).

- **Standard Mode**

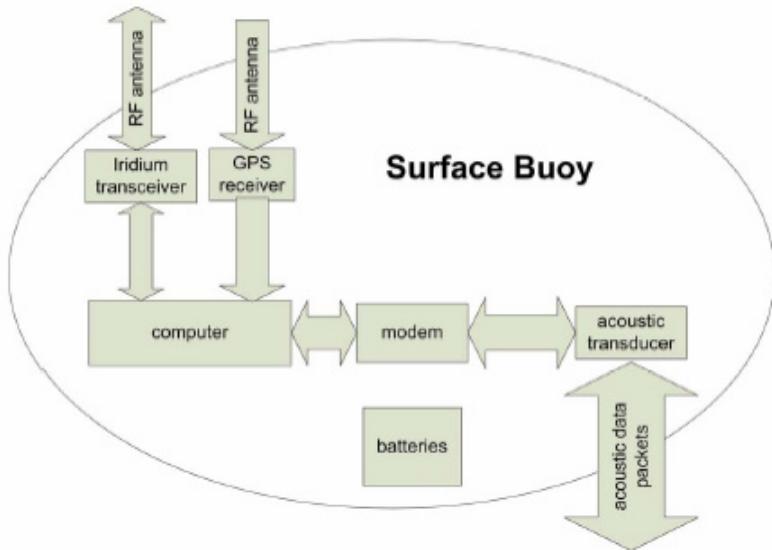
Prenosi podatke svakih 6 sati. Ti podaci sadrže prosječnu razinu mora, podatke o napajanju, itd. Ta kontinuirana mjerena BPR sustava osiguravaju njegov pravilan rad.

- **Event Mode**

Prenosi podatke u slučaju kada je pređen prag za detekciju tsunamia i/ili potresa. Svaki sat se prenose podaci o detektiranim valnim oblicima (kašnjenje je manje od 3 minute) sve dok algoritam za detekciju ne pređe u neaktivno stanje.

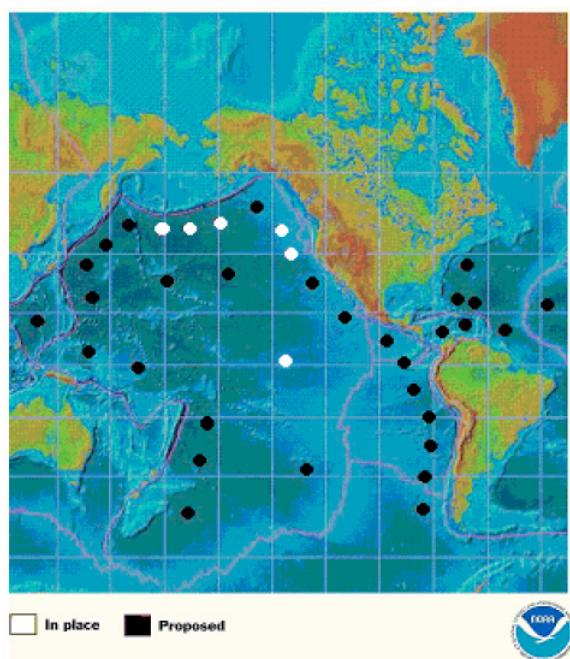
GPS-bova:

Prenosi podatke i komande od tsunametra do satelitske mreže. Ima dva elektronička sustava, gdje je jedan dodatan u slučaju kvara. Računalo i akustični modem identični su onima u sustavu tsunametra. Računalo se priključuje na odašiljač preko RS-232 serijskog porta. Podaci se prenose brzinom do 2400 buda. Tipično, u “**Standard Mode**” potrebno je oko 30 sekundi da se uspostavi veza, prenesu podaci i prekine veza. Pozicija GPS-prijamnika (Leadtek model 9546) zabilježava se jednom dnevno kako bi se utvrdio položaj bove.

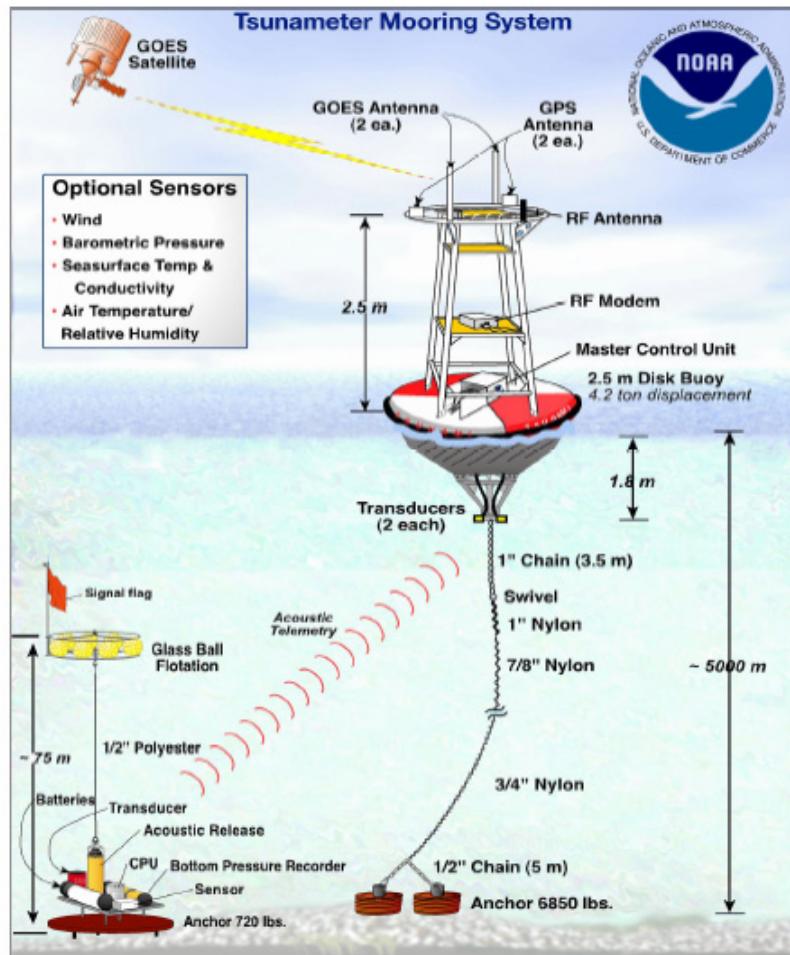


Sl.17. Sustav - Bova

24. siječnja 2005 godine NOAA je prezentirala kongresu detaljan izvještaj o sustavu rada za detekciju tsunamia. Dvije bitne slike iz tog izvještaja prikazane su na slikama 18 i 19. Prva slika prikazuje trenutni i novi predloženi raspored GPS-bova koji bi omogućio bolju detekciju nadolazećeg tsunamia. Druga slika je gotovo identična DART II sustavu i prikazuje NOAA DART platformu. Poboljšanja koja se tiču same platforme vezana su isključivo uz elektronički sustav – od BPR-a, mikrokontrolera, akustičnog modema, do GPS antene, itd.



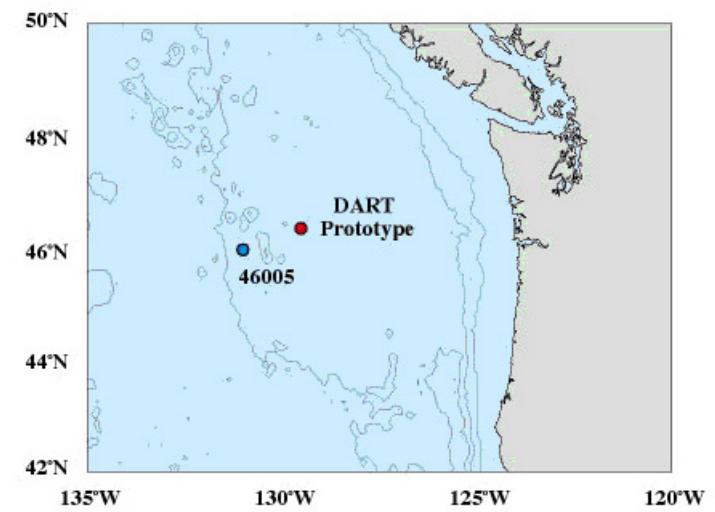
**Sl.18. Bijele točke – trenutni raspored bova, crne
točke – novi predloženi raspored bova**



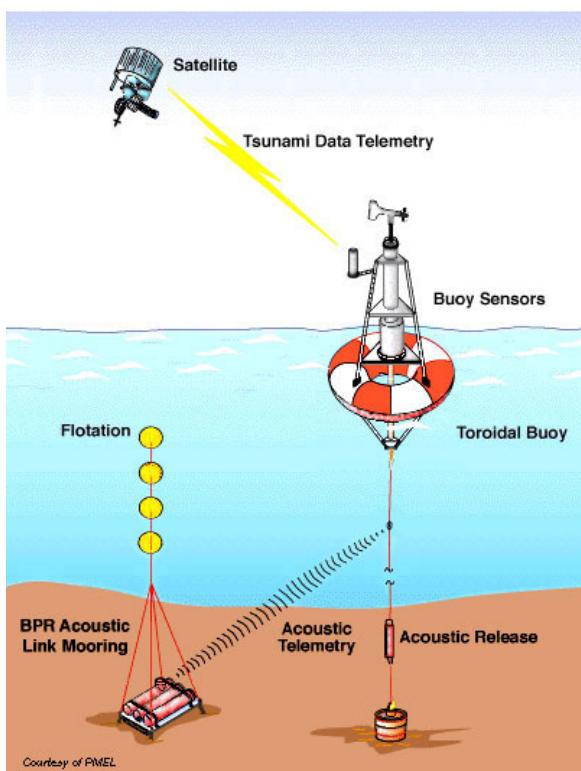
Sl.19. NOAA DART platforma

□ Prototip (1995)

Prototip real-time DART sustava dovršen je 1995 godine. Sustav se je pokazao robusnim, s 5 % gubitkom podataka. Prototip se je temeljio na podvodnom mjerjenju tlaka pomoću senzora što je omogućilo detektiranje tsunamia s amplitudama manjima od 0.5 cm u vodama dubine do 6 km. Senzor u BPR-u (engl. *Bottom Pressure Recorder*) bio je Paroscientific, Inc. model 410K. Signal koji se je dobivao sa senzora bio je frekvencije približno 36 KHz (raspon od 3 KHz). Prototip je bio testiran potresom iz 1988 godine u sjevernom Pacifiku. Na slici 21 se može vidjeti da su bila generirana dva vala: potresni val koji je uzrokovao vertikalno pomicanje

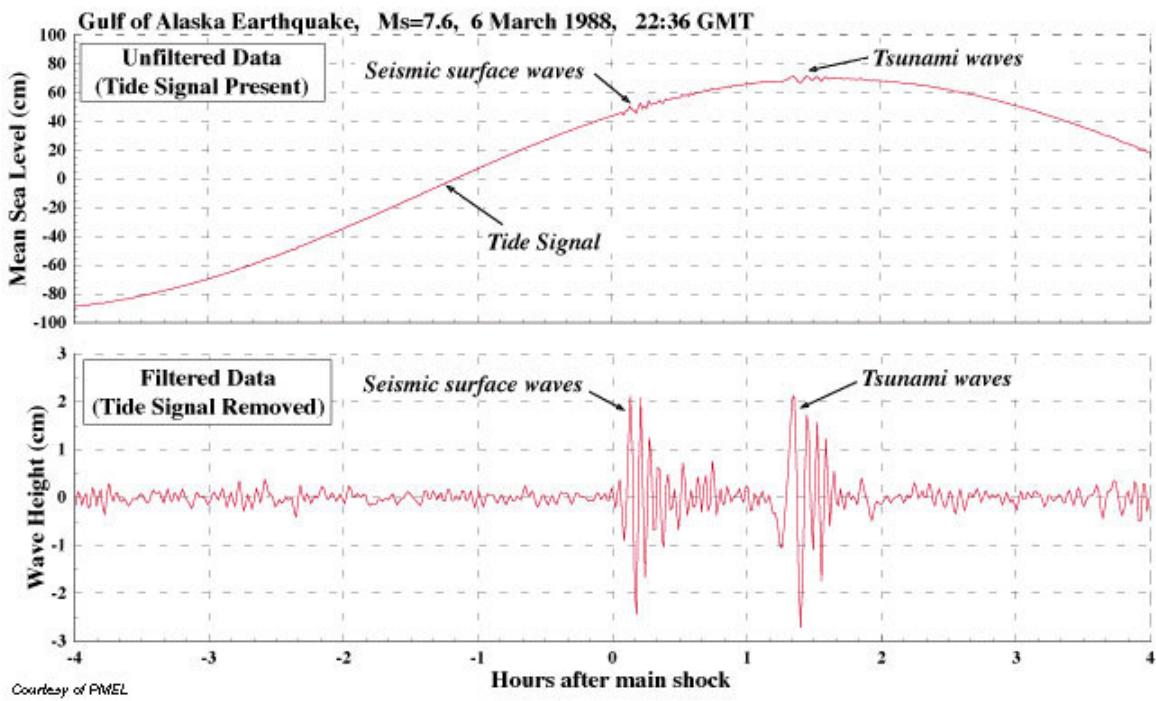


morskoga dna i tsunami koji je uzrokovao razmještaj morskog dna. Te podvodne valove zabilježio je BPR, svaki predstavljen kao odvojeni paket određene energije.



Prvi paket se je sastojao od potresnih valova koji su putovali brzinom od 11.000 km/h da bi bili detektirani od strane BPR-a za samo jednu minutu od trenutka nastanka prvog potresnog vala. Drugi paket pokazao je valove tsunamia koji su putovali brzinom od 800 km/h i bili detektirani nakon 70 minuta od trenutka pojave prvog potresnog vala. Slika 21 pokazuje sposobnost BPR-a da mjeri prve nadolazeće potresne i tsunami valove. Dakle, real-time prototipom bilo je moguće detektirati tsunami. Došlo je i do razvoja akustičnih modema s pomoću kojih su se podaci prenosili do bove i dalje

prema GPS-prijamnicima. Kod ovog prototipa korišten je bio par Datasonics ATM-845/851 modema. Ti modemi koristili su MFSK modulaciju s brzinom prijenosa podataka od 1200 bauda prilikom odašiljanja (u jednom smjeru) i FSK modulaciju s brzinom od 80 bauda pri primanju podataka (drugi smjer). U ovom prototipu BPR je bio modificiran na rad s ATM-845 modemom spojenim pomoću RS-232. Cijeli sustav je za napajanje koristio alkane baterije (kemijski izvor energije) čime je potrošnja bila dobro kontrolirana. Dosta se je pozornosti posvetilo akustičnom sustavu za prijenos i telemetriju podataka između dna i površine oceana. Poruka koja se je slala između jedinice s površine i jedinice ispod površine bila je fiksнog formata: fiksno zaglavlje od 4 charactera, CRC provjeru podatkovnog bloka, broj bloka, tip bloka podataka i blok podataka. Svaka poruka morala je biti potvrđena s ASCII ACK ili NAK karakterom. ACK karakter označavao je dobro pristiglu poruku, a NAK da poruka nije primljena. Ako strana koja je poslala poruku nije primila NAK ili ništa u zadanoj vremenu, poruka se je ponovno slala.



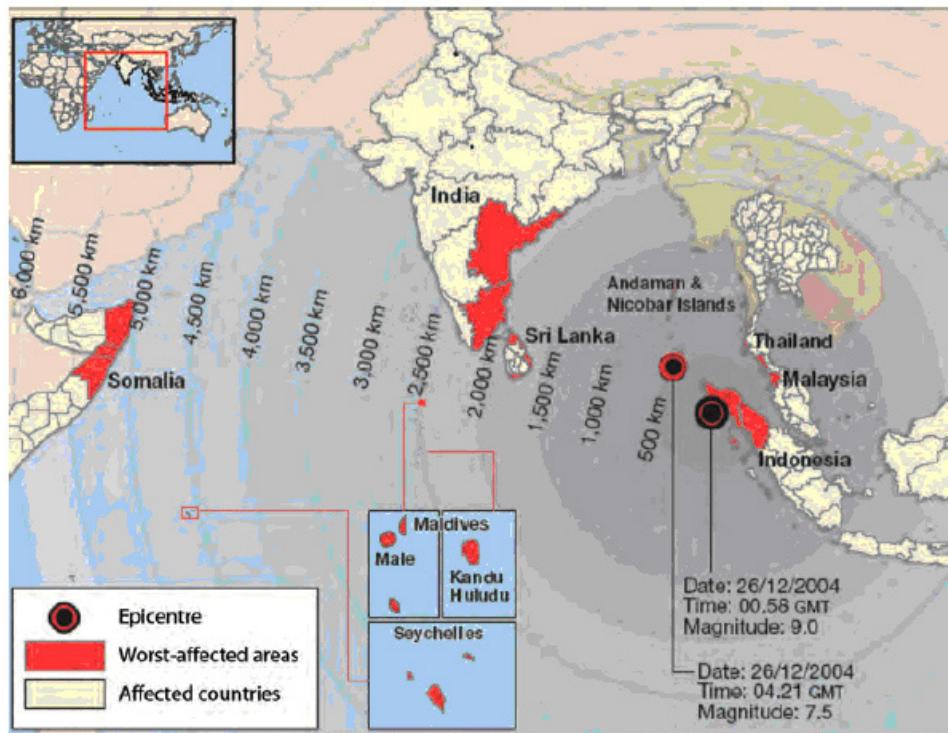
SI.21. Podaci od 6. ožujka 1988 godine, Zaljev Aljaske, potresni (7.6) i tsunami valovi

Prototip DART sustava bio je operativan od 23. svibnja do 19. srpnja 1995 godine. BPR, akustični modem, software protokoli i satelitski telemetrijski podaci očekivano su funkcionalirali u periodu od 57 dana. U tri slučaja, znanstvenici su snimili da jedinica ispod površine nije odgovorila na signal jedinice s površine. U svim drugim slučajevima podaci su se dobivali bez prekida i nije bilo pogrešaka u prijenosu. Iako je taj eksperiment bio vrlo uspješan, pokazao je potrebu za poboljšanjem cijelog sustava.

□ Pariški koncept (engl. Paris Concept)

Od 1993 godine ESA radi na ideji iskorištavanja GNSS-a i ugrađivanja različitih senzora na satelite kojima bi se mjerili pojedini atmosferski i oceanografski parametri. U ovom slučaju, radi se o izgradnji efikasnog sustava za detekciju tsunamia, pa senzori koji bi se ugrađivali na satelite su satelitski altimetri kojima se mjeri promjena razine mora u prostoru i vremenu. Taj princip mjerjenja nazvan je '*Paris*' i prvi put je ostvaren u ESETC eksperimentima. Ti eksperimenti dali su obećavajuće rezultate prema kojima je moguće satelitskim putem detektirati trenutnu razinu mora s točnošću od samo nekoliko *cm*. '*Paris*' u svojoj osnovi predstavlja radarski visinomjer, odnosno *Wide-swath altimeter* i omogućava prostornu pokrivenost do 1000 *km*, prilikom čega mjeri intenzitet reflektiranih radio valova s morske površine odašiljanih od strane

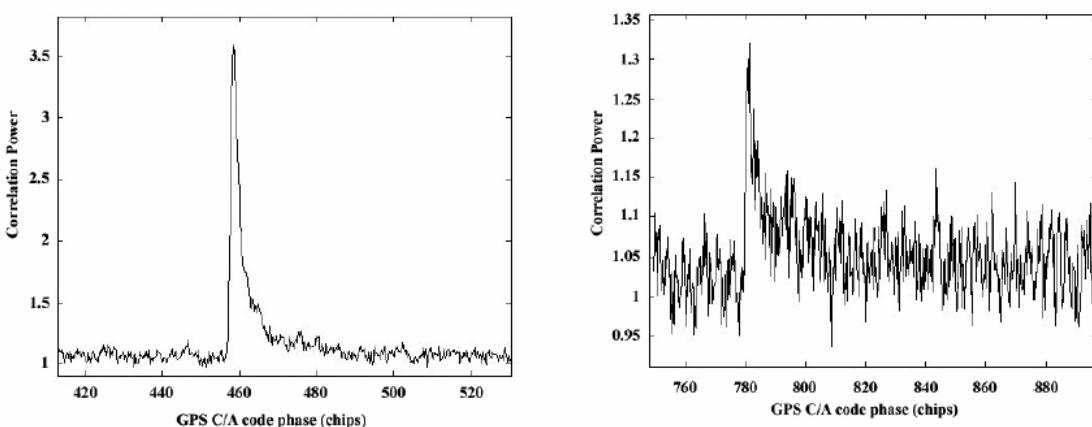
nekoliko GNSS satelita (tipično šest GPS-a i šest Galileo satelita kada su dostupni). 'Wide swath' znači da konstelacija od deset 'Paris' satelita s kutem od 45° (inklinacija) između orbitalne ravnine planeta i ekliptike (orbitalna ravnina Zemlje) može pokriti područje dijela Zemlje od $45^{\circ}S$ do $45^{\circ}N$ geografske širine i to u jednom satu. Kako 'Paris' ima visinsku rezoluciju od 5–10 cm i prostornu rezoluciju od 20–50 cm, lako bi bilo uočiti poremećaj kao što je tsunami, visine 30–60 cm i duljine vala do 100 km. Takva konstelacija satelita omogućila bi prvo vrijeme alarma za uzbunu od katastrofe manje od 45 minuta. Slika 23 prikazuje regije zahvaćene tsunamijem (mjesto epicentra, najviše zahvaćena područja i sveukupno zahvaćena područja).



SI.23.

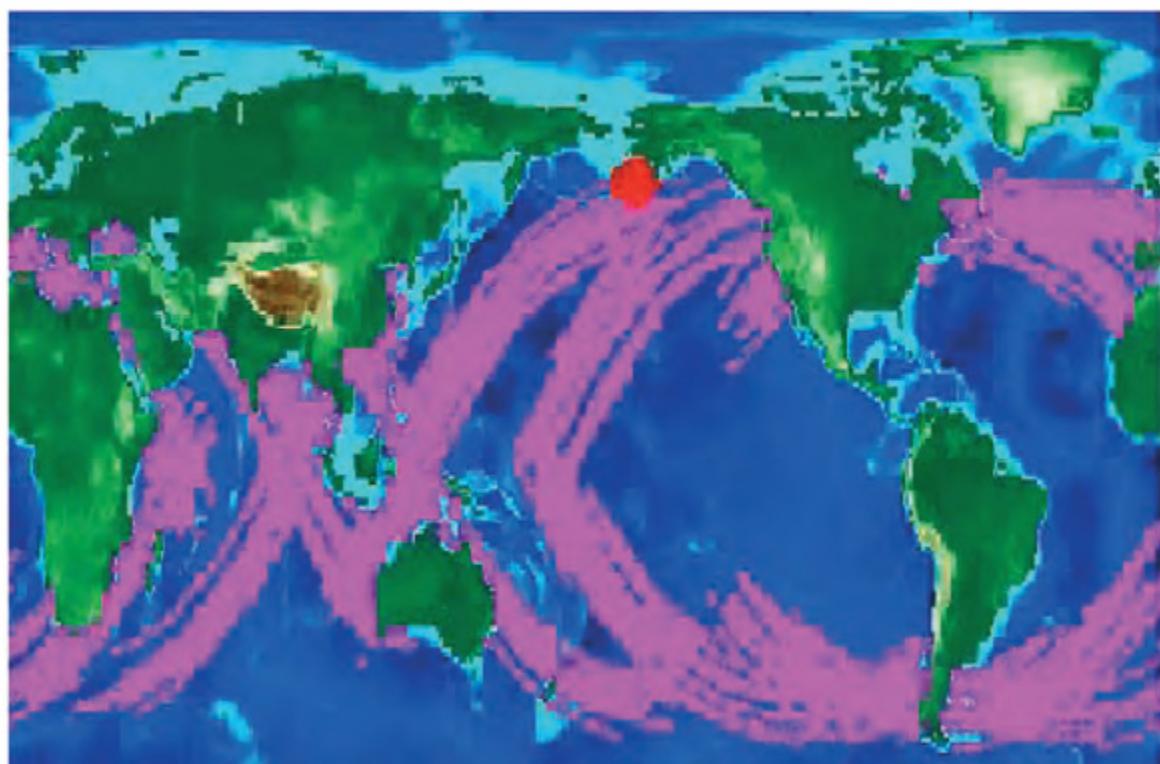
Dobra strana korištenja 'Paris' satelita za detekciju tsunamia je ugrađena instrumentacija koja je 'relativno' jeftina, i za razliku od uobičajenih altimetra, s njom je moguće istovremeno na velikom broju lokacija mjeriti razinu mora, zavisno o broju GNSS signala koje može obuhvatiti područje radio antene. Trenutno se radi na tome da su 'Paris' senzori u stanju pratiti i detektirati snop od 12 nezavisnih zraka. To znači da bi samo s jednim instrumentom prostorna pokrivenost svjetskog oceana bila povećana za faktor 12 u usporedbi s uobičajenim altimetrima.

Zračna demonstarcija 'Paris' koncepta dogodila se je 25. rujna 2001 godine pod vodstvom ESA-e i IEEC-a. Satelitima je bilo prekriveno područje Mediterana, Costa Brava. U toj regiji, prokop u podmorju (Palamos Canyon) uzrokuje poremećaj morske struje i uvjeti koji se mogu vidjeti na tom mjestu slični su tsunami na otvorenom oceanu. Ista mjerena obavljena su i godinu dana poslije, 27. rujna 2002 godine. Korišten je bio isti 'Paris' altimetar, a dobiveni rezultati nisu puno odstupali od originalnih. U rujnu 2003 godine lansiran je UK-DMC (engl. *UK contribution to the Disaster and Monitoring Constellation*) satelit u orbitu na 685 km . Satelit je bio namijenjen da daje snimke prirodnih katastrofa, kao što su potresi i tsunami, u vrlo kratkom vremenskom periodu. U taj projekt bio je uključen i 'Paris' realiziran SST-om (engl. *Surrey Satellite Technology*) uz potporu BNSC-a (engl. *British National Space Center*). Dobiveni rezultati bili su zadržavajući, podaci koji su primljeni od satelita sadržavali su vrlo precizne snimke signala koji su opisivali vrlo različita stanja oceana. Takva dva detektirana signala moguće je vidjeti na slici 24.



Sl.24. (Lijevo) GPS C/A code phase – reflektirani signal s površine oceana uz brzinu vjetra od 2.5 m/s (2 Beauforta), (desno) vrlo slab reflektirani signal uz brzinu vjetra od 11 m/s (6 Beauforta)

Prednost ‘Paris’ koncepta je u tome što je vrlo mala vjerojatnost pogreške da sustav zakaže. Budući da je tsunami prirodna pojava koja se ne javlja često, ‘Paris’ sateliti mogu služiti u tom vremenu i za druga mjerjenja vezana uz satelitsku oceanografiju.



**Sl. 25. Simulirani sustav za detekciju tsunami, val je označen cveno – praćen s deset
Paris satelita u nižoj Zemljinoj orbiti (smjer praćenja je označen
rozom bojom). Tsunami je bio detektiran za 33 minute**

4. Literatura

[1] Internet

[2] Communication systems, Simon Haykin, 4th edition, Jhon Wiley & Sons, 2001

[3] Tsunamis: Monitoring, Detection, and early Warning Systems, Wayne A. Morrisey, CRS Report for Congress