

DOPPLEROV EFEKT I MJERENJE MORSKIH STRUJA

Igor Tomažić,
Zavod za istraživanje mora, Institut "Ruđer Bošković", Zagreb

1. Povijest i metode mjerenja morskih struja

Oceanografija je široko područje u kojem se isprepliću razne znanosti sa ciljem istraživanja i proučavanja oceana i mora. Četiri su osnovne znanosti koje se bave proučavanjem mora:

- Geologija mora (geological oceanography): proučava granice između kopna i mora (dno i obala) kao i procese koji su doveli do stvaranja oceana i mora.
- Fizika mora (physical oceanography): proučava gibanja u moru (struje, oscilacije) i njegova svojstva (salinitet, temperatura, tlak, vodene mase ...) i odnos između atmosfere i mora.
- Kemija mora (chemical oceanography): proučava sastav morske vode i procese koji se odvijaju u njoj.
- Biologija mora (biological oceanography): proučava organizme u moru i njihov utjecaj na okolinu u kojoj žive.

Inženjerska oceanografija, kao posebno područje, bavi se dizajniranjem i stvaranjem opreme i instrumentacije za korištenje u moru.

Proučavanje struja u moru počelo je u 18 stoljeću kada se pokušao ubrzati protok vijesti i tereta između Engleske i Amerike. Tada je prvi puta kreirana mapa Golfske struje ([slika 1.1](#) – Franklin-Folger mapa Golfske struje) koja je pokazivala u kojem smjeru treba ploviti da bi se uštedjelo na vremenu.



Slika 1.1 Franklin-Folger mapa Golfske struje

I u današnje vrijeme struje u moru mjerimo i zbog komercijalnih razloga ali i zbog čisto znanstvenih razloga. Npr. utjecaj cvjetanja mora na turizam je ogroman ali uz pravilno saznanje o strujama u moru moguće je predvidjeti i pravovremeno sanirati posljedice.

Struje u moru moguće je mjeriti direktnim i indirektnim metodama. Indirektne metode sastoje se od mjerenja drugih parametara koje kasnije povezujemo sa strujama u moru. Primjer indirektna metode je analiza gibanja vodenih masa preko temperature i saliniteta.

Direktne metode dijele se u dvije skupine:

- a) proučavanjem čestice vode koja se giba (Lagrangova metoda)
- b) proučavanjem fiksne točke u prostoru i mjereći smjer i brzinu vode koja prolazi kroz tu točku (Eulerova metoda)

Čestica vode koja se giba može se pratiti bovom koja pluta na određenoj dubini i šalje svoju poziciju brodu. Voda na površini može biti označena bojom ili plutacom (drifteri) i satelitskim praćenjem (gps) utvrđuje se njena pozicija i izračunava brzina i smjer. Prije su se struje mjerile preko boca i kartica ili zanošenjem broda ali pokazalo se da su te vrijednosti bile dosta podcijenjene.

Strujomjeri služe za mjerenje smjera i brzine struja u moru u fiksnoj točki. Klasični strujomjer ([slika 1.2](#) – Aandera strujomjer) sastoji se od rotora koji mjeri brzinu strujanja i krila koje određuje smjer. Ako je strujomjer spojen na brod moguće je direktno očitavati vrijednosti a ako je strujomjer autonoman tada interno zapisuje vrijednosti i nakon vađenja iz mora očitaju se svi podaci. U novije doba koriste se ADCP-i (Acoustic Current Doppler Profiler) koji imaju mogućnost mjerenja struja u više slojeva i vrlo dobro zamjenjuju klasične strujomjere.



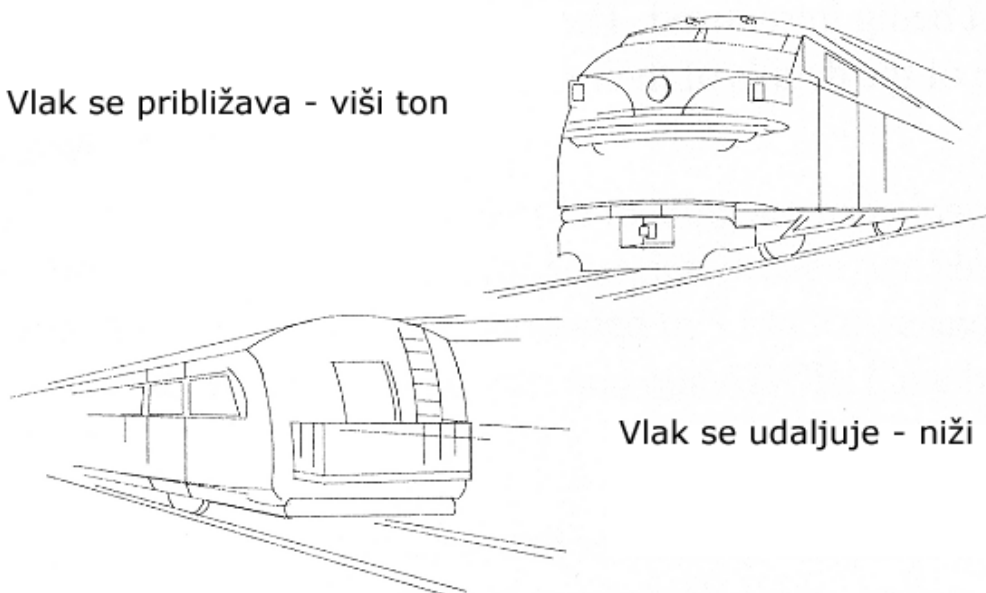
Slika 1.2 Klasični strujomjer (Aandera)

2. Dopplerov efekt

Slušajući zvuk vlaka kako prolazi pored nas možete čuti karakterističnu promjenu visine zvuka ([Slika 2.1](#) Promjena visine tona uslijed Dopplerovog efekta). Zvuk vlaka je viši kako nam se vlak približava i niži kako se vlak udaljava od nas ([Zvuk 1](#)). Tu promjenu visine zvuka tj. promjenu frekvencije nazivamo Dopplerov efekt (Doppler shift ili Doppler effect), a posljedica je razlike u broju oscilacija u sekundi koje stignu do našeg uha zbog gibanja izvora zvuka, u našem slučaju vlaka.

Dopplerov pomak pri prolasku vlaka

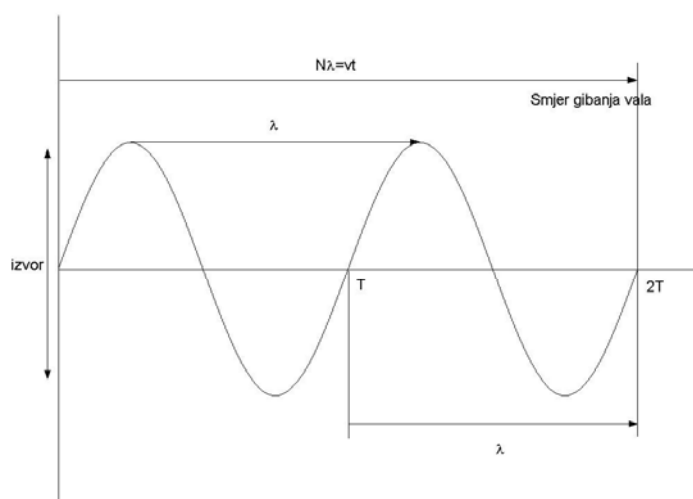
Vlak se približava - viši ton



Vlak se udaljuje - niži ton

Slika 2.1 Promjena visine tona uslijed Dopplerovog efekta

Dopplerov efekt otkrio je Christian Doppler (1803-1853) 1842. godine na osnovu proučavanja promjene frekvencije svjetlosti koju emitiraju zvijezde u dvojnog sustavu (dvije zvijezde koje se okreću jedna oko druge), ali Dopplerov efekt eksperimentalno je potvrdio C.H.D. Buys Ballot 1845. godine na Utrechtskoj željezničkoj stanici uspoređujući zvuk trubača koji stoje na jednom mjestu i trubača koji se gibaju. Dopplerov efekt javlja se u različitim slučajevima a zajednička osobina je relativno gibanje izvora valova i promatrača.



Slika 2.2 Val

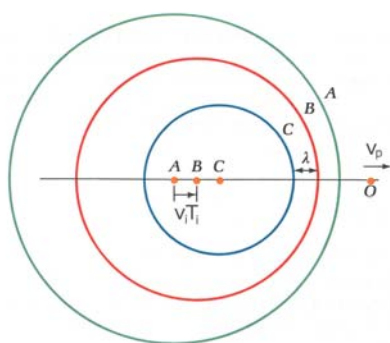
Svako valno gibanje širi se određenom brzinom v , ima valnu duljinu λ , valnu frekvenciju ν i period titranja T ([Slika 2.2](#) – prikaz vala). Valna duljina je udaljenost između dva uzastopna brjega ili dola, tj. razmak između dviju uzastopnih faza, period vala je vrijeme potrebno da val prevali jednu valnu duljinu (tj. vrijeme potrebno da val napravi jednu oscilaciju) a valna frekvencija je broj oscilacija u jedinici vremena ($\nu = 1/T$). Zamislimo da se u izvoru odvija osciliranje koje stvara val. U nekom vremenu t , izvor će stvoriti N valova čija će ukupna duljina biti $N\lambda$. Duljina je također jednaka putu prijeđenom u vrijeme t iz čega slijedi:

$$N\lambda = vt, \quad \frac{N}{t}\lambda = \nu t$$

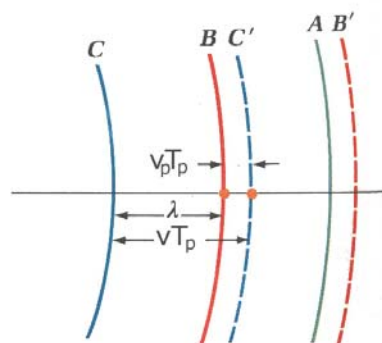
a broj oscilacija podijeljen vremenom u kojem se osciliranje odvija jednako je frekvenciji:

$$\nu\lambda = v$$

Kada su izvor vala i promatrač u relativnom kretanju (ili se promatrač giba ili se izvor giba ili oboje), postoji razlika između frekvencije koju emitira izvor vala ν_i i frekvencije koju primi promatrač ν_p . Nas zanima koji je odnos između tih frekvencija. Zbog jednostavnosti razmotrit ćemo slučaj kada smjer brzine promatrača i izvora leži na pravcu koji ih spaja ([Slika 2.3](#) – Kako se izvor giba kreiraju se uzastopni brjegovi). Također, promatramo slučaj kada je medij u kojem pratimo gibanje u mirovanju, brzina vala u tom mediju je v a pozitivan smjer x osi je od izvora vala prema promatraču.



Slika 2.3 Kreiranje uzastopnih brjegova zbog gibanja izvora



Slika 2.4 Brjeg vala pomakne se za udaljenost $v_p T_p$ od C do C' kada se promatrač udalji za $v_p T_p$

Prvo pronadimo valnu duljinu λ vala koju će primiti promatrač. Za svaki vremenski interval T_i (period osciliranja izvora), izvor će stvoriti vrh vala koji će uzduž x osi prevaliti put vT_i prije nego što izvor emitira novi vrh vala. Budući da se i izvor kreće uzduž x osi prema promatraču brzinom v_i slijedeći vrh vala bit će emitiran na udaljenosti $vT_i - v_i T_i$ što i predstavlja valnu duljinu (udaljenost između dva brjega):

$$\lambda = vT_i - v_i T_i$$

Sada uzmimo u obzir i kretanje promatrača i promatramo slučaj kada se promatrač udaljava od izvora brzinom v_p . U vremenskom intervalu T_p promatrač prevali udaljenost $v_p T_p$ a da bi promatrač ponovo opazio vrh vala, val mora proći udaljenost vT_p (vidi [sliku 2.4](#)), što je ustvari valna duljina λ plus udaljenost za koju se pomaknuo promatrač,

$$vT_p = \lambda + v_p T_p, \quad \lambda = (v - v_o)T_s$$

Eliminiramo λ i zamijenimo frekvenciju umjesto perioda ($T=1/\nu$), dobivamo:

$$v_p = v_i \frac{v - v_p}{v - v_i}$$

Dopplerov pomak za zvuk. U slučaju da je $v_p = v_i$ tada ne postoji Dopplerov pomak, tj. $v_p = v_i$.

Također, postoji razlika u Dopplerovom pomaku ako se promatrač giba prema izvoru ili se izvor giba prema promatraču, na taj način se može odrediti da li se izvor ili promatrač gibaju u odnosu na medij. Za razliku od zvučnih ili morskih valova, svjetlosti nije potreban medij kroz koji će se propagirati i samo relativno gibanje izvora i promatrača utječe na mjerenje Dopplerovog pomaka. c je brzina svjetlosti a v_R je relativna brzina između izvora i promatrača, tada je:

$$v_p = v_i \left(\frac{c + v_R}{c - v_R} \right)^{1/2}$$

Za male relativne brzine u usporedbi sa brzinom svjetlosti, razlika između vrijednosti dobivene Dopplerovim pomakom za zvuk i za svjetlost je vrlo mala.

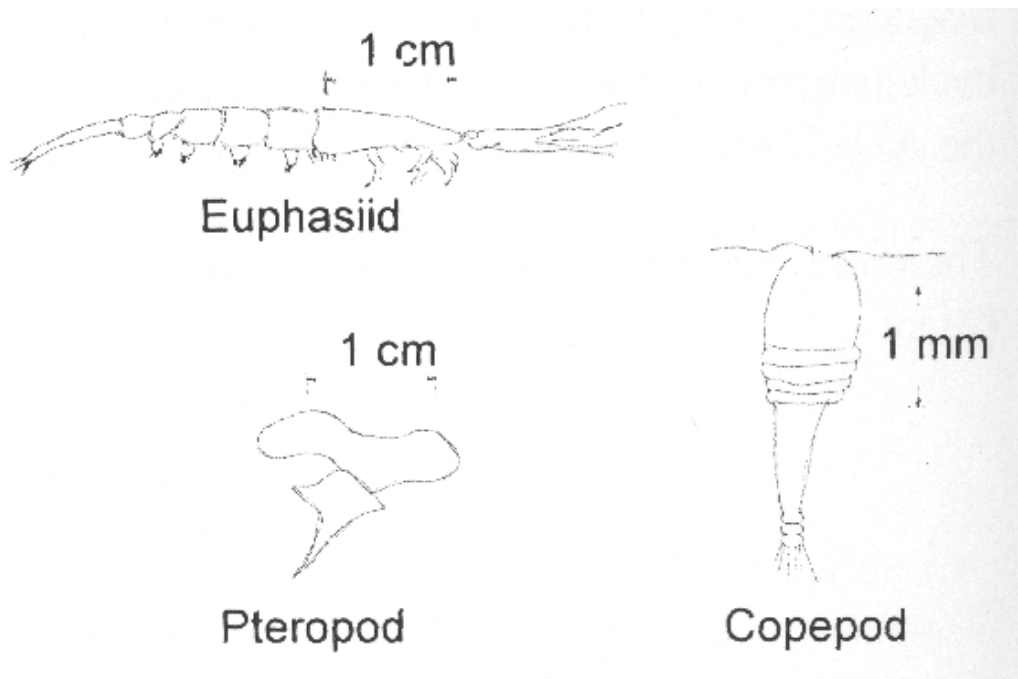
3. ADCP - Primjena Dopplerovog efekta na mjerenje morskih struja

Sada ćemo primijeniti Dopplerov efekt da bi izmjerili struje u moru, rijekama ili jezerima. Instrument koji mjeri brzinu struja zove se ADCP (Accoustic Doppler Current Profiler) [slika 3.1](#).

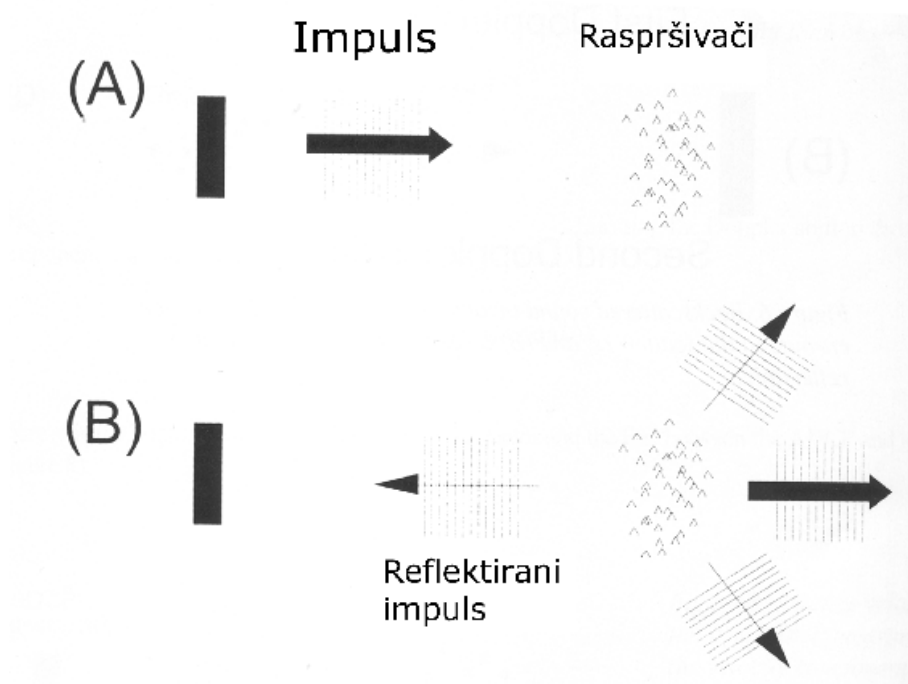


Slika 3.1 ADCP (Accoustic Current Doppler Profiler)

ADCP koristi Dopplerov efekt tako što odašilje zvučne signale na određenoj fiksnoj frekvenciji i prima povratni eho dobiven od raspršivača zvuka (sound scatterers) u vodi. Raspršivači zvuka su bilo koje čestice ili planktoni koji raspršuju zvuk nazad prema ADCP-u. Nalaze se svuda u moru i u prosjeku se kreću istom horizontalnom brzinom kao i voda, što je i najvažnija pretpostavka, jer ADCP u stvari mjeri brzinu tih raspršivača zvuka. [Slika 3.2](#) prikazuje tipične raspršivače zvuka u moru.

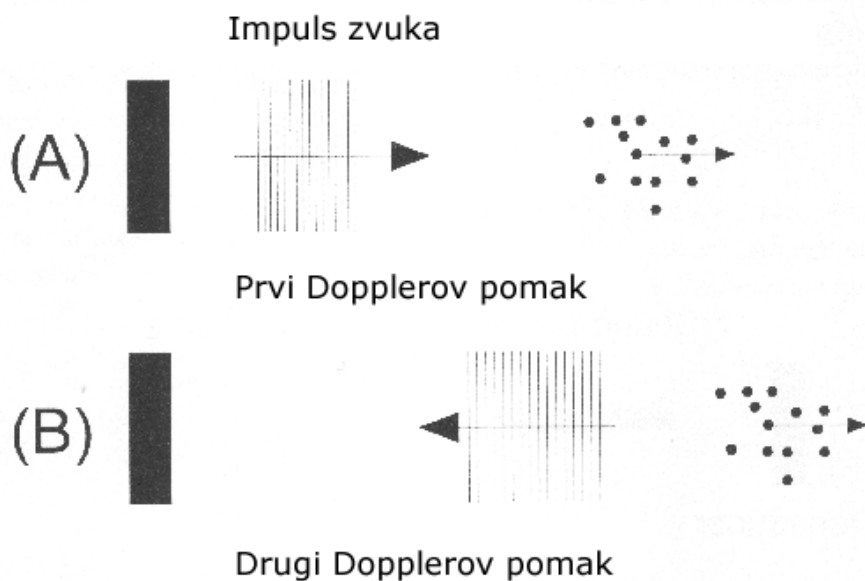


Slika 3.2 Raspršivači zvuka u moru



Slika 3.3 A) Poslani impuls, B) reflektirani impuls

Na česticama zvuk se raspršuje u svim smjerovima, ali najveći dio ipak prođe neraspršen ([slika 3.3](#) – a) poslani impuls, b) reflektirani impuls). Onaj dio koji se ipak reflektira nazad prema ADCP-u ima dvostruki Dopplerov pomak. Zašto? Budući da se čestice gibaju od ili prema izvoru (izvor je statičan), zvuk koji prime od ADCP-a ima Dopplerov pomak zbog njihovog gibanja. Raspršivanjem zvuka na njima, oni postaju novi izvor zvuka koji se giba od ili prema ADCP-u i ADCP prima reflektirani zvuk kao da ima dvostruki Dopplerov pomak ([slika 3.4](#) – dvostruki Dopplerov pomak, a) zbog čestica, b) zbog refleksije).

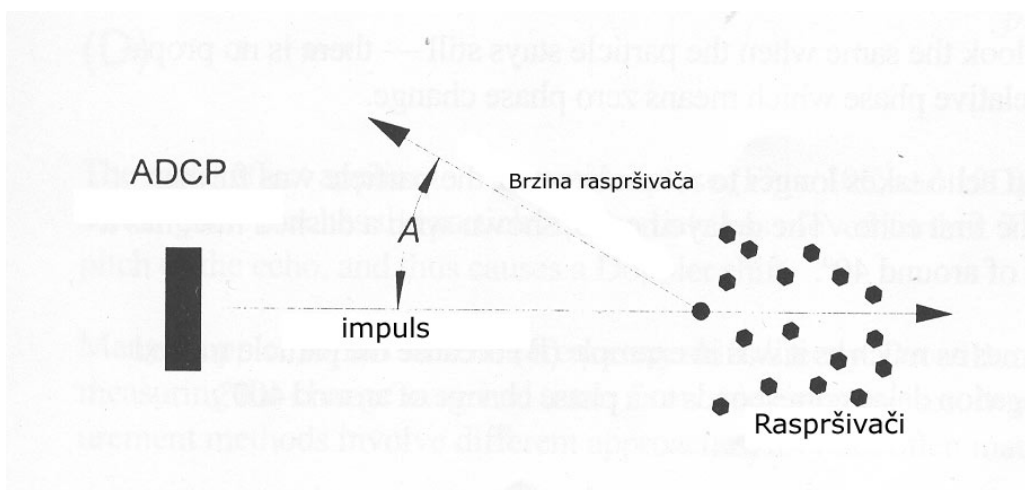


Slika 3.4 Dvostruki Dopplerov pomak, A) prvo, zbog gibanja čestica, B) drugo, zbog refleksije na česticama koje se gibaju

Budući da se Dopplerovim pomakom može mjeriti samo radijalna komponenta gibanja, jer gibanje raspršivača okomito na izvor ADCP ne mijenja njihovu udaljenost, u izraz za Dopplerov pomak potrebno je dodati novi član $\cos(A)$ ([slika 3.5](#) brzina raspršivača) i konačni izraz za Dopplerov pomak je.

$$\nu_p - \nu_i = 2\nu_i \frac{v_i - v_p}{v} \cos(A)$$

gdje je A kut između vektora brzine i pravca između raspršivača i ADCP-a a v je brzina zvuka u vodi.



Slika 3.5 Komponenta brzina koju mjeri ADCP

Na ovaj način mjeri se brzina pomoću promjene frekvencije, međutim moguće je mjeriti brzinu i pomoću dilatacije vremena. To znači da se mjeri vrijeme potrebno zvuku da stigne od instrumenta do raspršivača i nazad. Ako se čestica udaljava od ADCP-a vrijeme potrebno da se zvuk vrati do ADCP-a bit će veće nego kada čestica miruje. Pokazalo se da

mjerenje dilatacije vremena daje puno veću preciznost u odnosu na mjerenje promjene u frekvenciji.

Za sada smo se ograničili na mjerenje jedne komponente brzine iz jedne akustične zrake, međutim ono što nas zanima je brzina u tri dimenzije (istok-zapad, sjever-jug i gore-dolje). Da bi to bili u mogućnosti izmjeriti moramo imati bar tri akustične zrake postavljene u različitim smjerovima, a svaka zraka mjeri njoj paralelnu komponentu brzine. Međutim, budući da su zrake orijentirane u drugačijim smjerovima one mjere komponente brzine na različitim mjestima i bitna je pretpostavka da su struje horizontalno homogene, tj. da se u sloju, u kojem mjerimo struje, brzina prostorno ne mijenja. U slučaju oceana, rijeka i jezera ne postoje tolike prostorne varijacije brzine i horizontalni sloj je homogen za udaljenosti koje nas zanimaju.



Slika 3.6 ADCP i leće (transducери)

ADCP koristi četiri akustične zrake za mjerenje brzine ([slika 3.6](#) –adcp i leće). Jedan par zraka mjeri jednu horizontalnu komponentu i vertikalnu komponentu a drugi par zraka mjeri drugu horizontalnu komponentu, okomitu na prvu, i vertikalnu komponentu. Ukupno, mjeri se procjena dvije horizontalne brzine i dvije vertikalne brzine. Iz dvije vertikalne brzine računa se greška brzine koja daje pretpostavku da li su izračunate horizontalne brzine dobre ili ne. Na taj način vrši se provjera kvalitete podataka. Ako je razlika između dviju vertikalnih brzina velika to može značiti ili neku nehomogenost u sloju ili neku grešku u instrumentu, ali u oba slučaja ukazuje na grešku u mjerenju i lošu kvalitetu podatka.

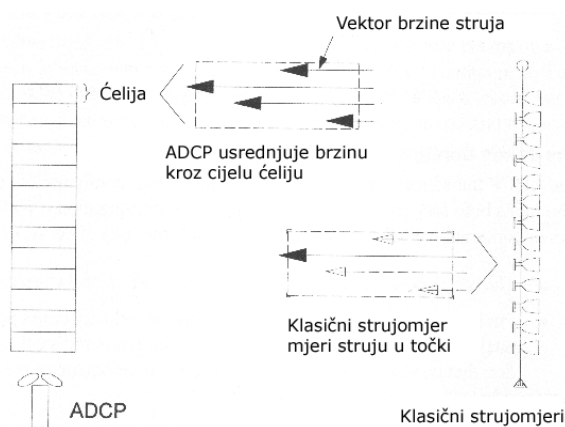
Takva konfiguracija zraka u kojoj postoje po dvije nasuprotne zrake zove se Janus konfiguracija, nazvana po rimskom bogu koji gleda istovremeno i naprijed i nazad.

Na taj način mogu se jednostavno eliminirati pogreške u horizontalnoj brzini nastale uslijed nagiba instrumenta.

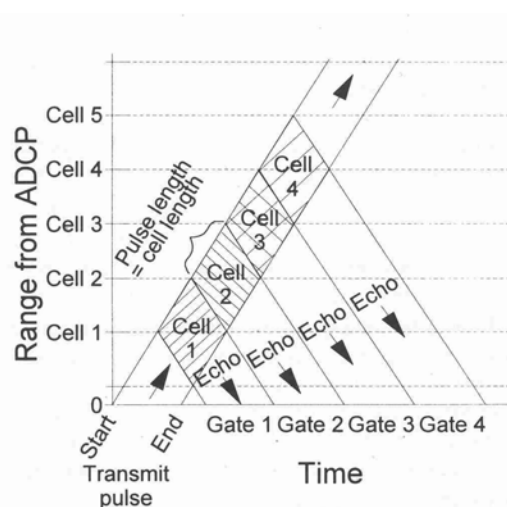
U nazivu instrumenta zadnja dva slova (CP – current profiler) označavaju mogućnost mjerenja vertikalnog strujnog profila. To je najvažnija stvar jer se pomoću ADCP-a mogu mjeriti struje u skoro proizvoljnom broju horizontalnih slojeva uniformno podijeljenih po dubini. Svaki sloj zove se ćelija ili bin i jedan takav sloj usporediv je sa klasičnim strujomjerom. ADCP, u stvari, predstavlja niz klasičnih strujomjera jednolično raspoređenih po dubini ([slika 3.7](#) – usporedba ADCP-a sa klasičnim strujomjerom). Međutim postoje dvije razlike:

1.) ADCP mjeri prosječnu vrijednost brzine u sloju dok klasičan strujomjer mjeri brzinu u određenoj točki.

2.) Slojevi u kojima ADCP mjeri brzinu moraju biti uniformno raspoređeni po dubini dok se klasični strujomjeri mogu razmjestiti proizvoljno po dubini.



Slika 3.7 Usporedba ADCP-a i klasičnih strujomjera



Slika 3.8 Procesiranje po slojevima

Međutim, u oba slučaja prednost je i dalje na strani ADCP-a, jer u slučaju uniformnog rasporeda slojeva, puno je lakše procesirati podatke koji su jednolično raspoređeni u odnosu na nejednolične podatke, a usrednjavanjem u sloju smanjuje se neodređenost mjerenja. Na koji način ADCP kreira slojeve u kojima mjeri brzinu? Nakon što ADCP pošalje signal čeka kratki trenutak u kojem ne postoji nikakvo procesiranje, te nakon toga počinje primati povratni signal. Primljeni signal vremenski se dijeli na jednake intervale i u svakom intervalu vrši se nezavisno procesiranje ([slika 3.8](#) – procesiranje po slojevima). Signalima iz udaljenih slojeva potrebno je više vremena da stignu do ADCP-a nego signalima iz bližih slojeva te se tako povezuje vremensko procesiranje sa procesiranjem po slojevima.

Za određivanje brzine struja u moru bitno je znati i grešku u mjerenju. Zbog toga ADCP uz zapis o brzini i smjeru struje zapisuje i intenzitet odziva (jačina povratnog signala), korelaciju (poklapanje između poslanog i primljenog signala) i postotak dobrih zapisa. Iz tih veličina možemo utvrditi da li su struje koje smo izmjerili stvarne ili ne.

Raspon frekvencija na kojima ADCP mjeri je od 75kHz do 1200 kHz i u tom rasponu moguće je mjerenje do 700 metara dubine.

Bitna stvar na ADCP-u su transduceri (leće) koji šalju akustične impulse. Aktivna tvar u transduceru je piezoelektrična keramička ploča koja se skuplja ili širi pod utjecajem električnog polja. Ploča je prevučena poliuretanom i postavljena u metalno kućište koje omogućava zaštitu od visokog tlaka na dnu mora.

ADCP je moguće postaviti i na brod i kako brod plovi vrše se mjerenja. Kod takvog načina mjerenja potrebno je imati točnu poziciju brodu u svakom trenutku a to je moguće dobiti putem diferencijalnog gps koji ima točnost 1 metar.

4. Barny

ADCP postavljamo na dno mora kako bi mjerili podatke u dužem vremenskom intervalu (do godine dana). Međutim, u obalnim područjima, gdje se najčešće i vrše mjerenja, ribarenje je najveći rizik za oceanografske instrumente postavljene na dno mora. Zbog toga se ADCP postavlja u kućište, nazvano BARNY (zbog svojeg barnacle - račjeg izgleda), koje svojim oblikom i masivnošću (2 metra širine, 70 cm visine i preko 300 kg težine) štiti instrument od ribarenja, tj. kočarenja ([slika 4.1](#) Barny, [slika 4.2](#) Barny 2). Ujedno BARNY sadrži instrumente koji omogućavaju autonomno vađenje iz mora, bez potreba za ronionicima ili ROV-ovima (remote operating vehicle). [Slika 4.3](#) i [slika 4.3a](#) prikazuje otvoreni Barny i instrumente u njemu.



Slika 4.1 BARNY reducirane veličine



Slika 4.3 Otvoreni BARNY s instrumentima



Slika 4.2 BARNY normalne veličine



Slika 4.3a Detalj otvorenog BARNY-a

Akustični "releaser" je instrument pomoću kojeg se bez potrebe za roniocem instrument sa kućištem može izvaditi iz mora. Kako? Svaki akustični "releaser" tvornički je programiran da "osluškuje" samo određeni kod na nekoj frekvenciji i na taj kod reagira (otključa, zaključa, itd...). Na brodu se nalazi drugi instrument, akustični "transmitter" koji odašilje određeni programirani kod ovisno o tome koji "release" želimo otključati. "Release" u kućištu spojen je na plutaču koja u slučaju otključavanja "releasa" izlazi iz kućišta i zbog pozitivnog uzgona isplivava na površinu. Plutača je konopom povezana sa kućištem i preko konopa se izvuče kućište na brod. Na taj način moguće je izvući instrument iz mora bez potrebe za roniocem.

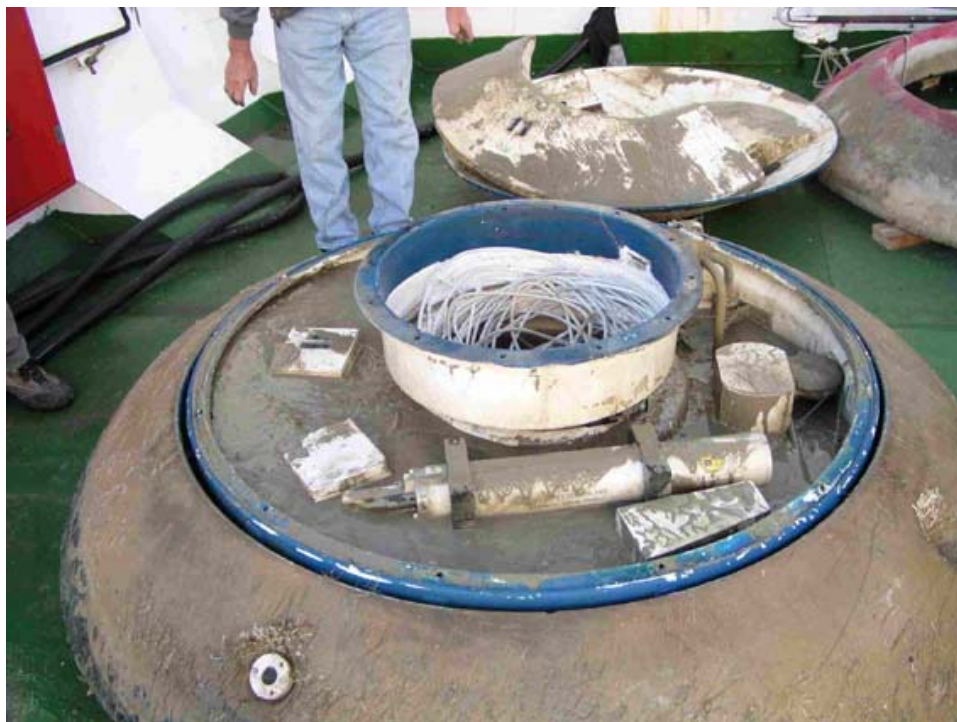
Jedan korak u postavljanju instrumentacije na dno prikazan je na [slici 4.4](#).



Slika 4.4 Stavljanje instrumenta u more



Slika 4.5 Aandera strujomjer nakon pola godine u moru



Slika 4.6 BARNY instrument nakon pola godine u moru



Slika 4.7 ADCP nakon pola godine u moru



Slika 4.8 Razlika zaštićene i nezaštićene podloge od obraštaja

A što se dogodi sa instrumentima nakon pola godine boravka na dnu mora vidljivo je na slikama [4.5](#), [4.6](#) i [4.7](#). Već nakon par mjeseci boravka u moru na instrumentima se počinju nastanjivati razni organizmi, račići, alge, morski crvi, ... koji ometaju normalan rad instrumenta. Takvo djelovanje zovemo obraštaj i može dovesti do potpunog prestanka rada nekog instrumenta, a brodove može usporiti i 10-20%. Zbog toga se instrumenti, a i brodovi premazuju toksičnim bojama koje sprečavaju nastanak obraštaja ([slika 4.8](#) – razlika zaštićene i nezaštićene podloge od obraštaja) i ostavljaju se u moru u ograničenom vremenskom periodu do godine dana.