

ASPEKTI MERENJA BRZINE VODE AKUSTIČNOM DOPLER ANEMOMETRIJOM

Damjan IVETIĆ, Jovan ĐORĐEVIĆ, Dušan PRODANOVIĆ
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

REZIME

U radu su analizirani različiti aspekti primene akustične Dopler anemometrije (merenje vektora brzine u jednoj tački) za merenje trenutne brzine vode, u kontekstu problema hidrotehnike. Opisan je fizički princip rada ove merne metode, koja se u dosadašnjem iskustvu pokazala kao izuzetno robusna i praktična za potrebe monitoringa i fundamentalnog istraživanja rasporeda brzina. U radu su prikazani neki od primera njene primene, kako u laboratorijskim tako i u terenskim uslovima. Navedena su i praktična ograničenja upotrebe ove metode, definisana na osnovu iskustva u primeni. Opisane su nasledne mane merne metode koje potiču od upotrebe Doplerovog principa za određivanje brzina: alijasing Doplerovog signala i pojava Doplerovog šuma. Alijasing signala predstavlja jedan od glavnih problema u upotrebi ove merne tehnike, budući da utiče na tačnost proračuna komponenti brzine. Podaci kontaminirani pojavom alijasinga se mogu obraditi u naknadnom procesiranju primenom nekog od algoritama za detekciju pikova i njihovu naknadnu zamenu. U radu su ukratko opisani algoritmi za detekciju pikova sa upotrebom filtra na bazi projekcija faza-prostor kao i na bazi korelacija između fluktuacija komponenta brzina. Takođe, u radu je predložen i algoritam za zamenu detektovanih podataka koji koristi interpolaciju fitovanih kubnih polinoma.

Ključne reči: merenje brzine, akustična Dopler anemometrija, monitoring

1. UVOD

Hidrauličke laboratorije, a generalno i hidrotehnička praksa, imaju jasnu potrebu za merenjem brzine vode sa visokom vremenskom i prostornom rezolucijom. Referentna oprema za ovu vrstu merenja u hidrauličkim laboratorijama je Laserski Dopler Brzinomeri (eng. Laser Doppler Velocimeter – LDV) kao i metoda praćenja čestica (eng. Particle Image Velocimetry –

PIV). Međutim obe ove metode prate izvesni problemi koji im praktično limitiraju upotrebnu vrednost. Neosporna je činjenica da ove merne tehnike komotno ispunjavaju uslove vremenske i prostorne rezolucije, međutim njihova primenljivost opada sa porastom dimenzija domena u kojem su ispituje određen hidraulički fenomen (Cea i saradnici, 2007). Praktično to znači da se u terenskim uslovima, za potrebe prakse, nijedna od navedenih metoda ne može koristiti. Drugi problem koji je zajednički za obe metode, je nemogućnost njihove primene u tokovima koji su opterećeni suspendovanim nanosom, nečistoćama i čvrstim otpadom. U većini ovih slučajeva, merna tehnika koja može da uspešno odgovori izazovu su ultrazvučni Akustični Dopler Anemometri ADA (eng. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV).

Upotreba ADA je generalno široko prihvaćena u oblasti hidrotehnike. Uzimajući u obzir specifične karakteristike ovog mernog pretvarača, omogućena je podjednako efikasna upotreba kako u terenskim tako i u laboratorijskim uslovima (Khorsandi i saradnici, 2012). Merna tehnika je prvi put uvedena u upotrebu 1993. godine i od tada se neretko koristi za merenje trenutnih vrednosti tri komponente vektora brzine u tački. U naučnom pogledu, studije i istraživanja koja su sprovedena upotrebom ovog pretvarača su različitih karaktera. Jedan od najčešćih zadataka koji se ispunjava upotrebom ADA je određivanje profila brzina u rečnim tokovima i u okviru hidrotehničkih objekata zarad proračuna protoka. U radu Prodanović i saradnici (2011) su opisani standardni problemi koji se javljaju pri određivanju protoka u neregularnim uslovima, sa osvrtom na raspolagajuće merne metode uključujući i ADA. Definisanje profila brzina za rečne tokove ima višestruku korist, pa se pored procene protoka mogu: definisati uslovi biološkog mikrohabitata, proceniti tangencijalni napona na dnu vodotoka, definisati turbulentna struktura toka, validirati numerički modeli kao i proceniti početni i granični uslovi za iste itd (Buffin-Belanger & Roy, 2005).

U domaćoj praksi je poznata činjenica da je monitoring, u najširem smislu reči, na prirodnim tokovima i hidrotehničkim objektima, na dosta niskom nivou zbog raznih uzroka. Često, upravo nedostatak podataka limitiraju znanje o uslovima rada, fenomenima i, nažalost, neželjenim događajima koji se dešavaju. U okviru ovog rada, upravo u predašnjem kontekstu, opisani su praktični aspekti upotrebe ADA merne tehnike, kao jednog od relativno jeftinih načina za obezbeđivanje podataka o trenutnim vrednostima vektora brzine vode, bitnom podatku za monitoring rada hidrotehničkih objekata. Fokus rada je na predstavljanju prednosti ali i mane ove merne tehnike, kao i načini da se otklone neke od mana koje prate njenu upotrebu, sve u cilju da se podstakne upotreba odgovarajuće merne tehnike u okviru monitoringa i analiza hidrotehničkih objekata i pojava.

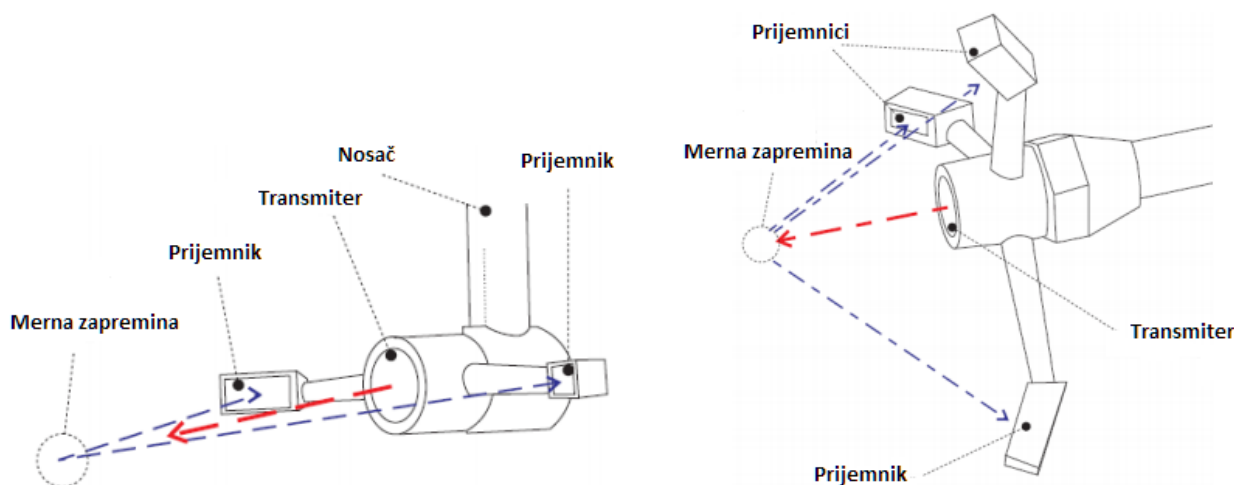
Struktura rada je koncipirana na sledeći način: u poglavlju 2. dat je sažeti teorijski opis načina rada ADA sonde; u nastavku u poglavlju 3. pobrajane su i ukratko opisane glavne prednosti i mane ovih uređaja potkrepljena iskustvima autora sa upotrebom u okviru hidrauličke laboratorije Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu; dok su u poglavlju 4. predstavljeni algoritmi za uklanjanje pikova u snimljenom signalu, koji kao pojava predstavljaju jedan od ključnih nedostataka koji prate njenu upotrebu.

2. OPIS ADA MERNE METODE

ADA je uređaj za daljinsko merenje trenutnih vrednosti komponenata vektora brzine, u sva tri koordinatna

pravca, originalno razvijen za upotrebu na ispitivanjima fizičkih modela (Voulgaris & Trowbridge, 1998). Princip rada ovog tipa mernog uređaja je zasnovan na efektu Doplerovog pomaka. Klasična dispozicija sonde podrazumeva upotrebu dva, tri ili četiri prijemne glave od 1-10 MHz i jednog centralnog pozicioniranog transmitera od 1-10 MHz (slika 1). Prijemne glave su radijalno postavljene sa inkrementom od 90, 120 i 180 stepeni, u zavisnosti od njihovog broja, tako da formiraju krug oko centralnog transmitera. Sonda se potapa u vodotok i prijemnici su nagnuti ka transmiteru tako da se fokusiraju ka jedinstvenoj mernoj zapremini čija udaljenost od glave transmitera zavisi od tipa sonde (obično je u rasponu od 5 do 15 cm). Udaljavanjem merne zapremine od glave ADA sonde, omogućeno je neinvezivno merenje brzine u vodotoku. Sama veličina merne zapremine zavisi od dužine emitovanog pulsa, širine perioda u kom prijemnici „odsluškuju“ odjek kao i od šablona emitovanih i primljenih pulseva. Uobičajena je aproksimacija merne zapremine cilindrom (ili elipsoidom), visine do 1 cm i prečnika do 0.8 cm.

ADA sonda u toku rada, emituje kratke akustične (talasne) pulseve duž kolone vode. Kako talas putuje kroz zahvaćenu kolonu vode, deo akustične energije se odbija i prelama od malih suspendovanih čestica u vodi. Metoda zahteva prisustvo suspendovanih čestica u vodi u kojoj se koristi, koje mogu biti veštačkog porekla ukoliko ih vodotok prirodno ne poseduje. Podaci o promeni faze $d\phi/dt$ od uzastopnih, koherentnih povratnih talasa se pretvaraju u procenu komponenata brzine. Iz ovih podataka može se dobiti podatak o brzini



Slika 1. Različite dispozicije ADA sonde; na levoj strani je varijanta sa dve prijemne glave a na desnoj sa tri.

U upravo koristeći Doplerovu relaciju:

$$U = \frac{c(d\varphi/dt)}{4\pi f} \quad (1)$$

gde je sa f obeležena radna frekvencija ADA uređaja (u opsegu 1-10 MHz), a sa c brzina zvuka. Podaci o promeni faze su definisani preko relacije:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{s(t)c(t+\tau) - s(t+\tau)c(t)}{c(t)c(t+\tau) + s(t)s(t+\tau)} \right] \quad (2)$$

gde je sa φ označena faza talasa (signala) u radijanima, t predstavlja vreme dok je τ vreme između dve transmisije. Sa $c(t)$ i $s(t)$ su obeleženi $\cos \varphi(t)$ i $\sin \varphi(t)$, respektivno. Na ovaj način primljeni signal može biti zapisan kao kompleksni broj $c(t) - is(t)$.

Analogno-Digitalni (AD) pretvarač se koristi za zapisivanje realnog i imaginarnog dela signala. Kroskorelacije i Autokorelacije prikazane u jednačini (2) su sračunate unutar ADA uređaja za sukcesivne parove pulseva. Nakon izvesnog broja transmisija uprosečuju pre računanja podatka o brzini. Vreme između transmisija τ , broj pulseva koji se uprosečuju M i opseg brzina koji se može izmeriti su međusobno povezani i korisnik ima mogućnost da definiše preko izbora opsega brzina za merenje. Različiti opsezi brzina koji se mogu izabrati su specifični za proizvođača i model sonde (za Nortek – Vectrino 1.6. su: ± 0.01 , ± 0.1 , ± 0.3 , ± 1.0 , ± 2.0 i ± 4.0 m/s).

Opisana merna metoda je direktnog karaktera, što znači da sistem ne zahteva nikakvu kalibraciju. Tri komponente trenutne brzine, u pravcima definisanim međusobnim uglovima između prijemnika i predajnika, dobijene iz jednačina (1) i (2) se transformišu u ortogonalni koordinatni sistem preko odgovarajuće matrice transformacije T :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sa (u, v, w) su obeležene komponente vektora brzine u ortogonalnom koordinatnom sistemu, dok su sa (V_1, V_2, V_3) označene komponente vektora brzine duž akustičnih osa odnosno bisektrisa između prijernih i predajnih osa. Vrednosti matrice transformacije zavise od položaja predajnika i prijernika i određuju se na osnovu geometrije sistema prijernik-predajnik. Transformaciona matrica je jedinstvena za svaki uređaj i ne menja se izuzev ukoliko dođe do fizičkog oštećenja uređaja.

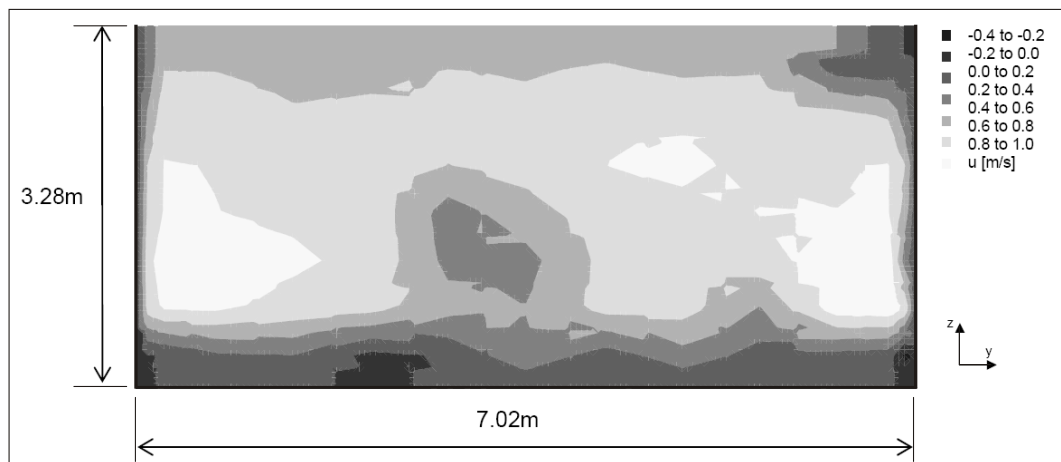
2.1. Primeri praktične primene ADA sonde

Kao što je već i spomenuto, ADA sonde su se od trenutka pojavljivanja na međunarodnom tržištu, koristile u brojnim laboratorijskim i praktičnim studijama. Robustnost metode omogućava akviziciju kvalitetnih podataka o trenutnim vrednostima komponentata vektora brzine u raznim uslovima koji mogu biti nepovoljni za ostale merne metode. U okviru ovog poglavlja, navedeni su neki od, uslovno, standardnih slučajeva u kojima se ova merna metoda može uspešno koristiti.

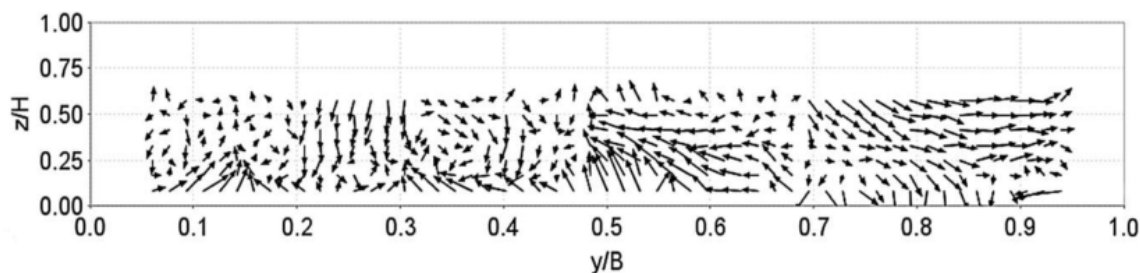
Jedan od čestih problema je određivanje protoka u nestandardnim hidrauličkim uslovima. Naime u praktičnim problemima, često se javlja slučaj da geometrija provodnika i ostali hidraulički uslovi nameću nestandardan raspored brzina (Zindović i saradnici, 2010), zbog čega se integralne metode za merenje protoka ne mogu koristiti sa visokom tačnošću. Na primer, u radu Staubli (2008) prezentovani su rezultati upotrebe ADA sonde u jedno ovakvoj situaciji, gde je procenjen protok na ulazu male hidroelektrane Emmenweid u Lucernu. ADA sondom je mapiran profil longitudinalnih brzina na osnovu čega je dobijena procena protoka sa neodređenošću od 1.5%. Rezultat mapiranja je prikazan na slici 2.

Pored problema određivanja ukupnog protoka, često postoji potreba za merenjem rasporeda pojedinih komponenti brzina po preseku. Pri razvijanju numeričkih modela kojima se opisuje strujanje sa slobodnom površinom, neophodan korak je validacija kao i kalibracija numeričkog modela. Validacijom se potvrđuje upotreba vrednost numeričkog modela, dok se kalibracijom parametri numeričkog modela prilagođavaju konkretnom slučaju primene. U radu Jesson i saradnici (2013), razvijen je složeni numerički model kojim se opisuje sekundarno strujanje u otvorenim kanalima. Numerički model je validiran i kalibrisan upotrebom ADA sonde gde su, nasuprot prethodnom primeru, korišćene transverzalne komponente vektora brzine. Polje izmerenih vektora brzina u jednom poprečnom preseku su prikazano na slici 3.

Takođe standardan slučaj terenske upotrebe ADA sonde je merenje vektora brzine u prirodnim rečnim tokovima, kao i u priobalnim delovima vodenih površina. Imajući u vidu visoku vremensku rezoluciju kojom ADA uređaj može da zabeležava podatak o brzini, moguće su i analize turbulentnih statistika u vodotocima. Ukoliko je zadatak da se odrede parametri koji opisuju turbulenciju



Slika 2. Rezultat merenja podužne komponente brzine na jednom zahvatu za turbinu na HE Emmenweid u Lucernu (Staubli, 2000).



Slika 3. Rezultat merenja transversalnih komponenata brzine u hidrauličkoj laboratoriji Univerziteta u Birminghamu za potrebe validacije i kalibracije numeričkog modela sekundarnog strujanja u otvorenim kanalima (Jesson, 2013).

stacionarnih vodenih tokova, u radu Buffin-Belanger i Roy (2005) preporučuje se snimanje vektora brzine u tački u trajanju od barem 60 s, kako bi se izbegao uticaj slučajnih grešaka na statistiku. Na slici 4, prikazana je upotreba ADA mernih uređaja za merenje brzina u vodotoku na malom subtropskom estuaru u Australiji, sa ciljem procene turbulentnih statistika (Chanson, 2008).

3. NASLEDNE MANE I PRAKTIČNA OGRANIČENJA ADA SONDI

Mada veoma robustna i praktična merne metoda, i upotreba ADA metode je praćena izvesnim problemima, od kojih se većina može u pripremi ili naknadnom procesiranju, otkloniti. Ovi problemi odnosno mane su okarakterisani kao nasledni, budući da potiču od fizike procesa koji se koristi u okviru ADA. Korisnik ovih uređaja je u obavezi da bude upoznat sa njima i da u zavisnosti od prirode problema u kojoj koristi samu sondu, utiče na njih. Mnogi korisnici i istraživači su se bavili tematikom uočavanja grešaka u



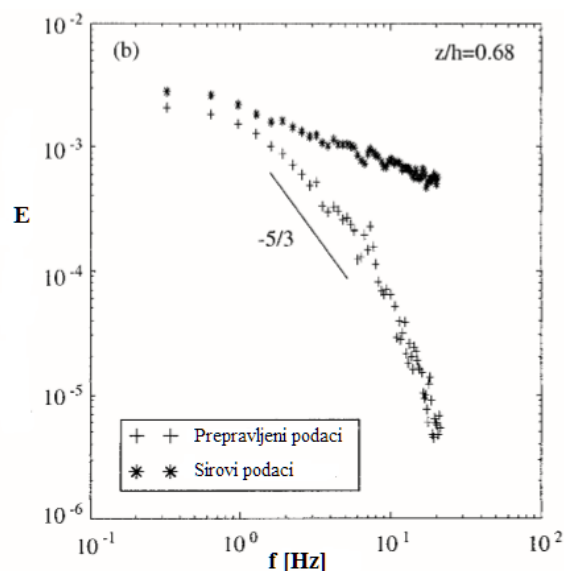
Slika 4. Upotreba ADA uređaja na malom estuaru u Australiji, radi procene turbulentnih statistika vodotoka (Chanson, 2008).

merenjima koje su posledice upravo ovih mana, kao i razvijanjem algoritama za njihovo otklonjanje. U nastavku je dat kratak opis dve ključne nasledne mane ADA, alijasing Doplerovog signala i Doplerov šum:

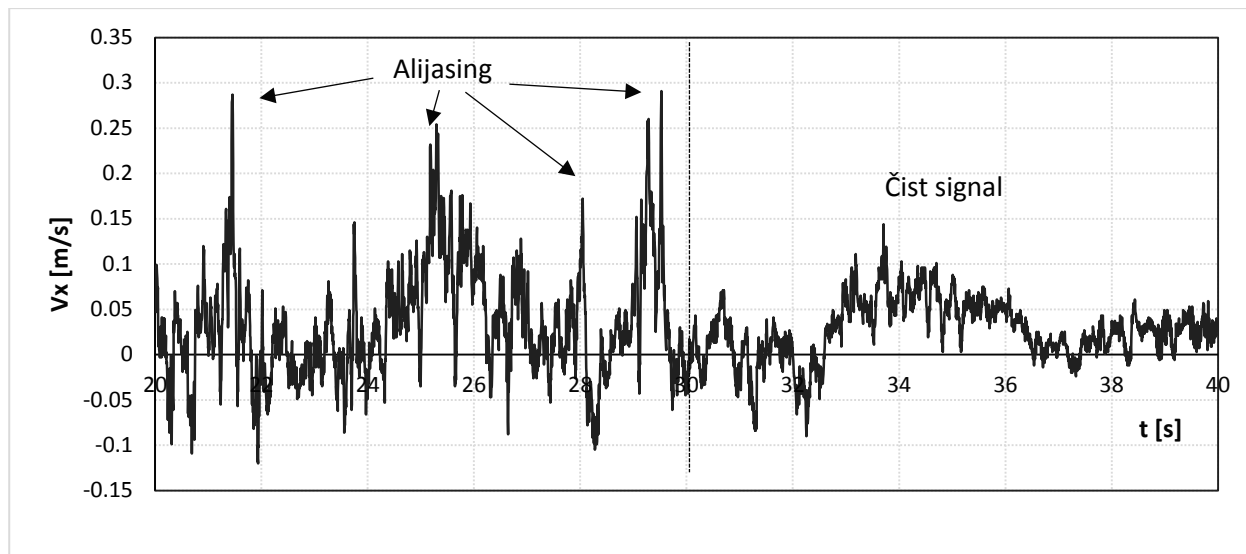
- **Alijasing Doplerovog signala** – Alijasing Doplerovog signala se može shvatiti kao pogrešna procena frekvencije odnosno faze odbijenog signala. Do alijasinga pri upotrebi ADA može doći na dva načina, ili usled nedovoljnog sadržaja suspendovanih čestica u mernoj zapremeni ili usled merenja brzine koja je izvan definisanog opsega uređaja. Naime, imajući u vidu da Doplerov uređaj meri fazni pomak između dva akustična pulsa, koji mora ležati u opsegu od 180° do -180° , ukoliko je fazni pomak izvan ovog opsega ADA uređaj daje podatak o pogrešnoj brzini. Za ADA uređaj je fazni pomak od 190° istovetan pomaku od -170° . Podaci o brzinama koji su dobijeni usled pojave alijasinga se primećuju na korisničkom ekranu kao pikovi sa ekstremnim vrednostima brzina (Slika 5). Prvi korak, koji korisnik može preduzeti je da poveća opseg brzina u kojem se koristi ADA uređaj. Ukoliko i dalje dolazi do alijasinga, problem predstavlja nedovoljna koncentracija suspendovanih čestica u vodotoku. Naime da bi se dovoljan deo energije poslatih impulsa vratio do prijemnika ADA uređaja, neophodno je da se u vodotoku nalazi dovoljna koncentracija suspendovanih čestica. Ukoliko vodotok ne sadrži prirodno suspendovane čestice, one se moraju ubaciti u njega. Ovaj proces se u praksi naziva „zasejavanje“ vode i kao „zasejivači“ se mogu koristiti razni prirodni i veštački materijali. Najbolji rezultati se dobijaju primenom komercijalnih borosilikatnih mikronskih sfera „Spherical 110P8“ proizvođača Potters, ili organskog mastila „Dytext Dye“ proizvođača Tintex. Pojedini istraživači su koristili i mleko, ljske od oraha ili abrazivna sredstva sa manje ili više uspeha. Čak iako se voda „zasejava“ ili poseduje prirodnu suspenziju, očekivano je će doći do pojave alijasinga ali u manjoj meri. Problem koji se može javiti je pogrešna procena brzine, kao i u slučaju analiza turbulentnih karakteristika: precenjena turbulentna kinetička energija i nepravilan energetski spektar. Pitanjem detektovanja i pravilne zamene pogrešnih podataka iz snimljenih serija bavili su se brojni istraživači, međutim u praksi su se dva algoritma izdvojila od ostalih. Goring i Nikora (2002) su predložili primenu filtera faza-prostor koji se do sada pokazao kao najrobustniji, dok su sa druge strane Cea i saradnici (2007) predložili algoritam koji ima prednost u tome što ne zahteva ručna podešavanja. Navedeni algoritmi su isprogramirani u okviru funkcije *Despiking ADA.m* koja se koristi na Građevinskom

fakultetu, Univerziteta u Beogradu. Metodologija na kojoj se algoritmi zasnivaju će biti ukratko opisana u poglavlju 4.

- **Doplerov šum** – Pojava Doplerovog šuma je prisutna u slučaju merenja turbulentnih karakteristika sa bilo kojim uređajem koji se zasniva na Doplerovom principu. Do pojave šuma dolazi usled rasipanja poslatih pulseva i konačnog vremena koje suspendovane čestice provedu u mernoj zapremeni. Sam relativni udeo Doplerovog šuma na „kvarenje“ turbulentnih statistika je funkcija karakteristika fluida kao i hidrauličkih uslova (brzina strujanja, turbulencija itd). Bitna je činjenica da pojava Doplerovog šuma ne utiče na osrednjeni podatak o brzini, budući da je po karakteristikama sličan tzv. „belom“ šumu. Međutim u izučavanju turbulentnih karakteristika toka, usled pojave ovog fenomena dobija se pozitivna greška na energetskom spektru, pogotovo u domenu velikih frekvencija (Slika 6). Izvestan broj istraživača se bavio ovim fenomenom i pokušajima da se on ukloni. Do sada, prihvaćene metode od strane naučne zajednice, su u mogućnosti jedino da utiču na izvedene statistike, kao što su Rejnoldsovi naponi, odnosno da ih preprave tako da se eliminiše uticaj šuma. Metode za eliminaciju Doplerovog šuma iz originalnog signala, kao npr. predložena od autora Nikora i Goring (1998), nisu prihvaćene. Od metoda koje prepravljaju izvedene turbulentne statistike, ističu se one od autora Hurther i Lemmin (2001), kao i od Khorsandi i Saradnici (2013).



Slika 6. Energetski spektar sirovih podataka i nakon primene algoritma predloženog od strane Hurther i Lemmin (2001)



Slika 5. Prikaz pojave alijasinga Doplerovog signala na seriji podataka o brzini dobijenih u okviru merenja u laboratoriji građevinskog fakulteta

3.1. Praktična ograničenja u primeni ADA sonde

Pored naslednih mana, gledajući iz aspekta korisnika, od interesa su i praktična ograničenja koja su iskustveno definisana. Svakako je korisno ovakva ograničenja imati na umu pri planiranju projekta monitoringa na nekom hidrotehničkom objektu. Najbitnija su navedena u nastavku:

- **Potreba za zasejavanjem vode** – Pri planiranju monitoriniga inženjer mora imati na umu da je za izbegavanje alijasinga Doplerovog signala, neophodno obezbediti dovoljnu koncentraciju suspenzije vodotoka. Ukoliko se ne radi o monitoringu fekalne kanalizacije ili vodotoka, prirodno opterećenim suspendovanim nanosom, neophodno je projektovati i sistem za doziranje „zasejivača“ na mernom mestu. Pri tome, nije dobro imati ni previše „zasejanu“ vodu.
- **Blizina čvrste konture** – Iskustvo u primeni ADA sonde je dovelo do saznanja da blizina čvrste konture može imati uticaj na izmerene podatke o brzini. Ovde se radi o blizini konture kako u vertikalnom smislu, tako i u horizontalnom smislu. Naime, preporučuje se da čvrsta kontura bude udaljena od merne zapremine barem 3 do 4.5 cm u oba pravca (Chanson, 2008). Primećeno je da parametar koji definiše kvalitet signala, odnos šum/signal (eng. Signal to Noise Ratio – SNR) pada ispod 15 dB, ukoliko ovaj uslov nije ispunjen i dalje dovodi do pogrešnih procena komponenata brzine.

- **Gabarit merne zapremine** – Merna zapremina ADA uređaja je relativno mala kao i što je ranije definisano – približno 0.25 cm^3 . Međutim sa aspekta kalibracije određenih numeričkih modela tečenja sa modeliranom turbulencijom, ova zapremina je prevelika da bi se ADA koristio. Naime numerički modeli Simulacije Velikih Vrtloga (eng. Large Eddy Simulation – LES), Odvojene Simulacije Vrtloga (eng. Detached Eddy Simulation – DES) i Direktno Numeričke Simulacije (eng. Direct Numerical Simulation – DNS) koriste numeričke mreže sa znatno manjim preredom između čvorova mreže (Davidson, 2015).

Uprkos navedenim ograničenjima, ADA je generalno prihvaćena kao robustna metoda koja može ispuniti zahteve nauke i prakse.

4. DETEKCIJA I OTKLANJANJE PODATAKA SA GREŠKOM USLED ALIJASINGA

Ključan problem koji opterećuje dobijanje tačnih rezultata primenom ADA je pojava alijasinga Doplerovog signala. Srećom, podaci koji su sadrže u sebi grešku usled ove pojave se mogu detektovati, izbaciti i zameniti primenom nekih od algoritama razvijenih za tu svrhu. U okviru ovog poglavlja su predstavljena dva, prema iskustvima autora, najefikasnija algoritma koja se mogu koristiti u ovu svrhu. Oba algoritma su implementirana u funkciju

Despiking ADA.m razvijenu za potrebe Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Obrada signala u kojem je evidentirana pojava alijasinga se sastoji od dva međusobno nezavisna koraka. Prvi je detekcija pika koji predstavlja pogrešan podatak, a drugi korak je njegova zamena sa procenjenom tačnijom vrednošću. Sami algoritmi koji su korišćeni se razlikuju samo u metodologija prema kojoj se detektuje pogrešan podatak. Imajući navedeno u vidu, u nastavku su razdvojeni koraci detekcije i otklanjanja podataka sa greškom usled alijasinga.

4.1. Detekcija podatka sa greškom usled alijasinga

„Phase-Space Threshold Filter“ (Goring i Nikora, 2002) - Prvi algoritam o kojem će biti reči je prihvaćen u naučnoj i inženjerskoj zajednici kao najefikasniji i najrobustniji za primenu na signalima dobijenim merenjem ADA sondama. Metoda se zasniva na primeni dijagrama faza-prostor na kojima se prikazuje zavisnost između promenljivih i njihovih izvoda. Svaka komponenta brzine se tretira zasebno i tako svaki izmereni podatak o komponenti brzine predstavlja tačku na ovakvom odgovarajućem dijagramu. Oblak tačaka bi trebao da je ograničen elipsoidom koji se definiše prema univerzalnom kriterijumu. Ukoliko tačka nije unutar elipsoida, smatra se pikom i izbacuje se i serije podataka. Metoda je iterativna, gde se u okviru svake iteracije preračunava elipsoid, kako bi se na kraju došlo do stanja u kojem nijedna tačka nije izvan elipsoida. Ukratko koraci algoritma su:

1. Proračun zamena za prvi i drugi izvod:

$$\Delta u_i = (u_{i+1} + u_{i-1})/2 \tag{4}$$

$$\Delta^2 u_i = (\Delta u_{i+1} + \Delta u_{i-1})/2 \tag{5}$$

2. Proračun standardnih devijacija $\sigma_u, \sigma_{\Delta u}, \sigma_{\Delta^2 u}$, za promenljive $u_i, \Delta u_i$ i $\Delta^2 u_i$

3. Za svaki par promenljivih (u_i i Δu_i ; Δu_i i $\Delta^2 u_i$; u_i i $\Delta^2 u_i$) potrebno je izračunati elipsu koja će odvojiti vrhove od ispravnih rezultata:

$$(\lambda_U \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \tag{6}$$

$$(\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \tag{7}$$

Gde je sa λ_U predstavljen univerzalni prag:

$$\lambda_U = \sqrt{2 \ln n} \tag{8}$$

Sa n je označen broj mernih podataka koji se koristi u algoritmu. Oznake a i b predstavljaju dužu i kraću

osu elipse, a menjaju se u zavisnosti od vrednosti koje se prikazuju na grafiku, dok θ predstavlja ugao rotacije u odnosu na glavnu osu a izračunava se pomoću kros-korelacije:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right) \tag{9}$$

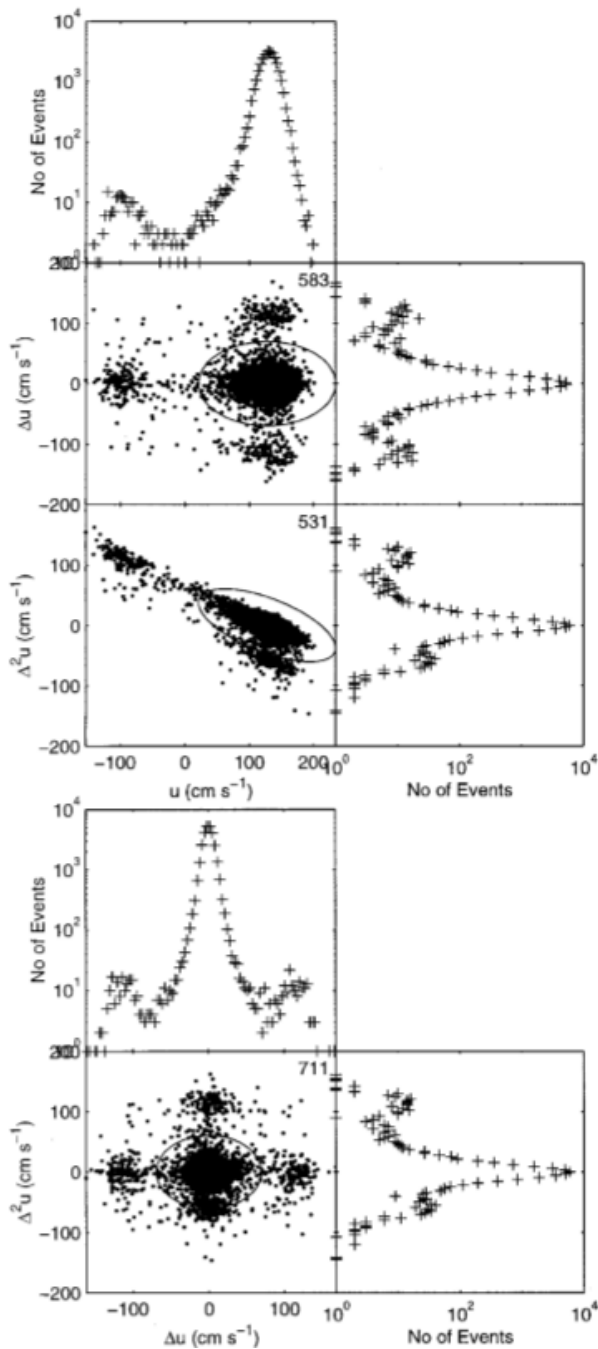
4. Zamena detektovanih pikova sa procenjenim tačnim vrednostima.

Iterativnim postupkom ponavlja se proračun dok se ne očiste svi vrhovi, odnosno dok broj „dobrih podataka ne postane konstantan. Na slici 7. su prikazani rezultati prvog prolaza algoritma na signalu sa značajnim brojem kontaminiranih podataka.

„Velocity Correlation Filter“ (Cea i saradnici, 2007) - Drugi algoritam obrađen u okviru ovog rada je nešto novijeg datuma i zapravo se zasniva na idejama prethodno opisanog algoritma, s tim što se sada koriste dijagrami međusobne zavisnosti komponenata brzina (tačnije fluktuacija komponenata brzina). Takođe, bitna razlika se ogleda u tome što se primenom ovog algoritma, podaci ne zamenjuju tokom iteracija, već isključivo nakon završetka celokupnog procesa detekcije. Razlog za ovakvu proceduru, po rečima autora algoritma, je u tome što se u visoko turbulentnim tokovima dešava da zamenjeni podaci predstavljaju nove pikove čime se iterativni proračun produžava. Još jedna prednost ovog algoritma je u tome što se sada sve tri komponente brzine tretiraju zajedno, tako da kada se detektuje pik, sve tri komponente menjaju. Pored toga, u ovom slučaju, proces detekcije ne zavisi od frekvencije uzorkovanja, čime je omogućeno uspešno tretiranje podataka merenih sa niskom frekvencijom uzorkovanja. Sa druge strane na ovaj način je onemogućena eksploatacija činjenice da diferenciranjem signala mogu da se izraze njegove visoke frekventne komponente. Kao i u slučaju algoritma sa faza-prostor filtrom, svi dobri podaci se nalaze unutar elipsoida definisanog pomoću univerzalnog praga λ_U . Koraci algoritma su ukratko opisani u nastavku za ravan fluktuacija komponenata brzina $u' - v'$:

1. Primena linearne regresije na ravan $u' - v'$. Iz uslova da su srednje vrednosti fluktuacija $\sum u' = \sum v' = 0$, mogu se odrediti vrednosti koeficijenta u jednačini prave $v' = mu' + b$ dobijene linearnom regresijom:

$$b = 0 \tag{10}$$



Slika 7. Rezultati u prvoj iteraciji primene „Phase-Space Threshold filter“ algoritma na seriji podataka sa značajnim brojem kontaminiranih podataka. Na faza-prostor dijagramima, u gornjem desnom uglu je prikazan broj detektovanih pikova (Goring i Nikora, 2002).

$$m = \tan \theta = \frac{\sum u'_i v'_i}{\sum u_i'^2} = \frac{\overline{u'v'}}{\overline{u'^2}} \quad (11)$$

Gde je sa θ predstavljen ugao rotacije elipsoida u odgovarajućoj ravni.

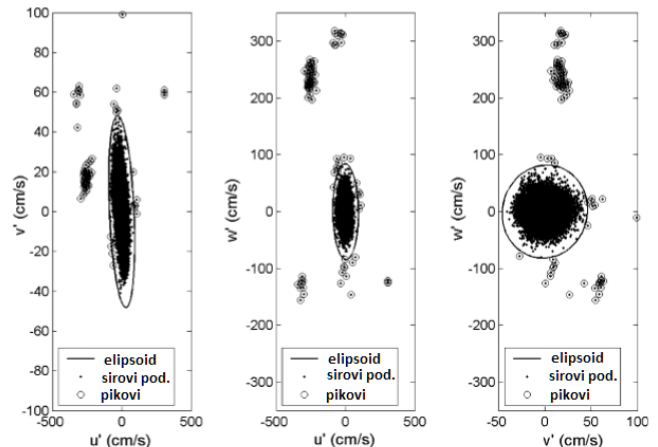
- Proračun velike i male ose a i b elipsoida u odgovarajućoj ravni:

$$a^2 = \frac{(\lambda_U \sigma_u \cos \theta)^2 - (\lambda_U \sigma_v \sin \theta)^2}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta} \quad (12)$$

$$b^2 = \frac{(\lambda_U \sigma_v \cos \theta)^2 - (\lambda_U \sigma_u \sin \theta)^2}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta} \quad (13)$$

- Uklanjanje kontaminiranih podataka.

Postupak se nastavlja u iteracijama, dok se ne uklone svi podaci koji nose grešku usled alijasinga. Tek onda dolazi do zamene podataka sa procenjenim tačnim vrednostima. Rezultat u prvom prolazu primene opisanog algoritma na primer signala sa dosta kontaminiranih podataka je prikazan na slici 8.



Slika 8. Rezultati u prvoj iteraciji primene „Velocity correlation filter“ algoritma na seriji podataka sa značajnim brojem kontaminiranih podataka (Cea i saradnici, 2007).

4.2. Zamena podatka sa greškom usled alijasinga

Nakon detekcije podataka koji poseduju grešku usled alijasinga, preostaje da se isti zamene sa što tačnijom procenom. Na raspolaganju je nekoliko pristupa, međutim nijedan nije teorijski zasnovan:

1. Ekstrapolacija na osnovu podataka koji prethode kontaminiranom: $u_i = u_{i-1}$ ili $u_i = 2u_{i-1} - u_{i-2}$,
2. Srednja vrednost cele serije,
3. Procena na osnovu fitovanja glatke krive,
4. Interpolacija na osnovu podataka sa obe strane pika.

Od navedenih, za oko najlepší, rezultat se dobija primenom pristupa 3. Prvi pristup ima je problematičan kod podataka dobijenih merenjem na izrazito turbulentnim tokovima, budući da se mogu dobiti procene koje su još lošije od detektovanog pika. Iskustveno, Goring i Nikora (2002), su predložili upotrebu četvrtog pristupa, gde se sa obe strane pika fituje kubni polinom kroz 12 tačaka, i kao zamena se koristi srednja vrednost njihovih ekstrapolacija. Autori su usvojili ovaj pristup i u funkciji *Despiking ADA.m*, s tim što je omogućeno uzimanje i većeg broja tačaka za fitovanje kubnih polinoma. Pogotovo se preporučuje da se koristi veći broj tačaka ukoliko je frekvencija uzorkovanja veća od 100 MHz.

5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada detaljnije su razmatrani različiti aspekti praktičnog korišćenja Akustične Dopler Anemometrije (ADA) za merenje trenutnih vrednosti komponenta vektora brzine. ADA je relativno nova metoda koja se vremenom pokazala kao izuzetno praktična, kako za laboratorijsku tako i za terensku upotrebu. Dat je matematički i kvalitativni opis merne metode i načina na koji se od podataka o faznom pomaku dolazi do podataka o brzini, posredstvom Doplerovog principa. Doplerov princip zahteva prisustvo suspenzije u vodotoku koji se analizira. ADA je direktna metoda, što implicira da tokom korišćenja nije potrebna kalibracija mernog uređaja. Prikazani su klasični primeri primene metode, od problema određivanja protoka u hidraulički nestandardnim uslovima, preko kalibracije i validacije numeričkih modela do određivanja turbulentnih karakteristika toka. Apostrofirane su nasledne mane merne metode, alijasing Doplerovog signala kao i pojava Doplerovog šuma. Takođe navedena su i praktična ograničenja upotrebe ADA, proistekla iz iskustva autora i drugih korisnika. Imajući u vidu da je alijasing Doplerovog signala ključna mana koja ima dominantan uticaj na pojavu greške u merenjima, predstavljeni su i algoritmi koji su implementirani u funkciju *DespikingADA.m* koja je razvijena za potrebe Građevinskog fakulteta,

Univerziteta u Beogradu. Algoritam zasnovan na fazaprostor filtru se u dosadašnjoj praksi pokazao kao najrobusniji, dok je drugi algoritam na bazi filtra korelacije brzine manje robusan ali je potpuno nezavistan od podešavanja korisnika.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na podršci u realizaciji projekta TR37010 pod nazivom: „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“, čiji je sastavni deo bilo ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] Buffin-Bélanger, T., & Roy, A. G. (2005). 1 min in the life of a river: Selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology*, 68(1–2), 77–94.
- [2] Cantero, M. I. (2005). Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, (December), 1062–1073.
- [3] Cea, L., Puertas, J., & Pena, L. (2007). Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in Fluids*, 42(3), 333–348.
- [4] Chanson, H. (2008). Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) in the field and in laboratory: Practical examples. International Meeting on Measurements and Hydraulics of Sewers, Brisbane, Australia.
- [5] Davidson, L. (2015). Fluid mechanics , turbulent flow and turbulence modeling. Lecture Notes Chalmers University of Technology, Sweden.
- [6] García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., & García, M. H. (2005). Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1062–1073.
- [7] Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117–126.
- [8] Hurther, D., & Lemmin, U. (2001). A correction method for turbulence measurements with a 3D acoustic doppler velocity profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(3), 446–458.
- [9] Jesson, M., Sterling, M., & Bridgeman, J. (2013). Modeling Flow in an Open Channel with Heterogeneous Bed Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 195–204.

- [10] Khorsandi, B., Mydlarski, L., & Gaskin, S. (2012). Noise in Turbulence Measurements Using Acoustic Doppler Velocimetry, (October), 829–838.
- [11] Poindexter, C. M., Rusello, P. J., & Variano, E. A. (2011). Acoustic Doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implications for measurement. *Experiments in Fluids*, 50(5), 1429–1442.
- [12] Prodanović D. (2006): *Merenje malih brzina u terenskim uslovima*. Vodoprivreda, Vol. 38, No. 222-224, strane 205-214.
- [13] Prodanović D. (2010): *Studija mogućnosti merenja protoka na HE „Đerdap 2”*. Interni dokument HE „Đerdap 2”, Beograd.
- [14] Staubli T. (2000): *Flow Field Upstream of a Trash Rack Measured with an Acoustic Doppler Probe*. IGHEM 2000, Kempten, Germany.
- [15] Voulgaris, G., & Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 272–289.
- [16] Zindović B., M. Jovanović, R. Kapor, D. Prodanović, D. Djordjević (2010): *Numerička simulacija strujnog polja u blizini vodozahvata*. Vodoprivreda, godina 42, broj 246-248

ASPECTS OF WATER VELOCITY MEASUREMENTS WITH ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETRY

by

Damjan IVETIĆ, Jovan ĐORĐEVIĆ, Dušan PRODANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Summary

The paper analyzes the various aspects of acoustic Doppler anemometry usage, for the measurements of instantaneous water velocity, in the context of the problems of hydraulic engineering. Physical principle of the measuring method is described. The method itself, in current experience, is proved to be extremely robust and practical for the purposes of monitoring, research, etc. Some of the examples of its application both in the laboratory and in field conditions are shown. Practical limitations in the method usage are defined, on the basis of experience in the application. Inherent flaws of the method, which are originating from the use of the Doppler principle for determining speed, are described: Doppler signal aliasing and the appearance of the Doppler noise. Signal aliasing is one of the main

problems in the use of this measurement technique, since it affects the accuracy of the measured velocity components. Data contaminated by aliasing errors, can be processed in the post processing by applying some of the algorithms for the detection of peaks and their subsequent replacement. The paper briefly describes the algorithms for the detection of peaks with the use of a filter based on a projection of the phase-space as well as on the basis of correlation between fluctuating velocity components. Also, algorithm for replacement of detected erroneous data using the fitted cubic polynomial interpolation is presented.

Key words: velocity measurements, acoustic Doppler velocimetry, monitoring

Redigovano 07.11.2016.