سیستم‌های تعیین موقعیت شناورهای زیر دریایی

دکتر علیرضا آزموده اردلان
دانشیار قطب مهندسی نقشه برداری و مقابله با سوانح طبیعی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
ardalan@ut.at.ir
مهندس عبدالحسین حاجی زاده
کارشناس ارشد هیدروگرافی دانشگاه تهران
hajizadeh6331@gmail.com

چکیده

در ایـن مـقاله روش‌هـای مـختلف تـعیین مـوقعیت زیـر دریـائی شـامل LBL,SBL,USBL,GIB و ترکیبی از آن‌هـا مـعرفی مـی‌شود و مـزایـا، مـعایب و کاربردهای هر کدام به صورت جداگانه ارائه، سپس مطابق با شرایط محیطی منطقه نظیر عمق، توپوگرافی، نویزهای مزاحم و غیره، سیستم مناسب ارائه می‌شود و در نهایت با توجه به اینکه کشور ایران از قسمت جنوب، بـه آب‌هـای اسـتراتـژیک، دریای عمان و خلیج فارس متصل می‌باشد، سیستم مناسب برای هـر کـدام ارائـه می‌شود.

کلمات کلیدی: شـناور زیـر سـطحی، GIB,USBL,SBL,LBL، خـلیج فارس، دریای عمان، امواج صوتی.

۱- مقدمه

ایجاد یک سیستم تعیین موقعیت زیر دریائی همچون سیستم‌های تعیین موقعیت دیگر قابل تجزیه بـه سـه بـخش (۱) کـنترل، (۲) فـرستنده‌های بـا موقعیت معلوم و (۳) گیرنده‌های با موقعیت مـجهول است. تـفاوت عـمده سیستم تعیین موقعیت زیر دریائی با سیستم‌های تعیین موقعیت معمول در ژئودزی در محیط انتشار امواج مابین فرستنده و گیرنده بـوده کـه در مـورد سیستم‌های تعیین موقعیت دریائی، این محیط آب مـی‌باشد. انـتشار امـواج الکترو مغناطیس در آب دارای محدودیت برد بوده و بدین لحاظ می‌بایست با امواج فراصوتی جایگزین گردد. این جایگزینی اساس تـفاوت طـراحـی یک سیستم تعیین موقعیت زیر دریائی با سیستم‌های تعیین موقعیت معمول (همچون GPS) را به وجود می‌آورد.

با توجه به گسترش علوم وفنون و استفاده‌ی روز افزون بشری از منابع دریائی و زیردریائی و نیز سازه‌ها و فـعالیت‌های عـمرانـی کـه بـه صـورت گسترده در دریـا صـورت مـی‌پذیرد، هـمچون اکـتشافات دریـائی، نـصب سکوهای نفتی، لوله‌گذاری در زیر دریا، امکان اندازه‌گیری هندسی و دانستن موقعیت در زیر آب در قالب یک سیستم تعیین موقعیت موضعی و یا جهانی از ضروریات تکنولوژی روز به شمار می‌رود.

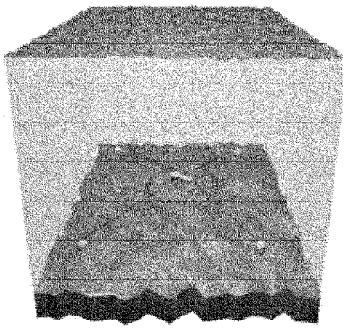
۲- روش‌های آکوستیکی تعیین موقعیت زیر دریائی

۲-۱- طول باز بلند [۱] (LBL)

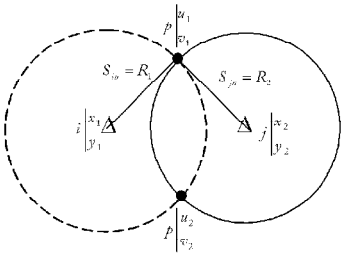
در سیستم LBL یک تـرانسـدیوسر[۲] صـوتی در کـف زیـرین شـناور سطحی یا زیر سطحی و حداقل سه ترانسپوندر در بستر دریا نصب می‌شود (نگاره ۱)، که با ارسال سیگنال بین ترانسدیوسر و آرایـه تـرانسـپوندرها، و دریافت سیگنال بازگشتی، فاصله بین آن‌ها از طریق قانون $x=\frac{vt}{2}$ با فرض معلوم بودن سرعت صوت و زمان انتقال محاسبه می‌شود.

از نظر اصول ریاضی می‌توان از دو ترانسپوندر در بسـتر دریـا اسـتفاده کرد اما در این حالت یک ابهام در موقعیت به وجود می‌آید به این معنی کـه موقعیت مجهول در کدام سمت سطح موقعیت قرار دارد (نگاره ۲).

بنابراین حداقل سه ترانسپوندر برای تعیین موقعیت لازم می‌باشد و بـا افزایش تعداد ترانسپوندرها، درجه آزادی افزایش مـی‌یابد. در روش LBL، فاصله بین ترانسپوندرها که به خط مبنا[۴] معروف است در بازه چند کیلومتر قرار دارد.



نگاره ۱: تعیین موقعیت طول باز بلند



نگاره ۲: وجود ابهام در موقعیت

مزایا

■ جزء تکنیک‌های معروف می‌باشد که به طور وسیع مورد استفاده قرارمی گیرد.

■ در آب‌های عمیق بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

■ دقت آن مستقل از عمق می‌باشد.

■ دقت آن وابسته به فرکانس مورد استفاده و فاصله بین ترانسپوندرها می‌باشد.

■ همزمان می‌توان چندین شناور سطحی و زیر سطحی بااستفاده از تراسپوندرهای یکسان موقعیت خود را بیابند.

معایب

■ نیاز به انداختن و پرتاب کردن ترانسپوندر در آب

■ هزینه زیاد پیاده کردن سیستم

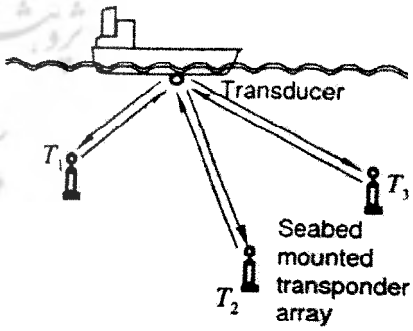
■ کالیبره کردن ترانسپوندرها

■ بازنگری و بازرسی ترانسپوندرها

■ گم شدن و خراب شدن ترانسپوندرها

مطابق نگاره ۳ مختصات ترانسپوندر (u,v,w) معلوم و مختصات x,y,z شناور سطحی یا زیر سطحی مجهول می‌باشد. می‌توان با روابط خطی زیر موقعیت مجهول را بدست آورد:

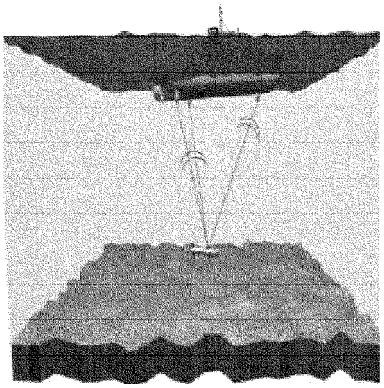
$$R_1 = \sqrt{(x-u_1)^2 + (y-v_1)^2 + (z-w_1)^2}$$
$$R_2 = \sqrt{(x-u_2)^2 + (y-v_2)^2 + (z-w_2)^2}$$
$$R_3 = \sqrt{(x-u_3)^2 + (y-v_3)^2 + (z-w_3)^2}$$



نگاره ۳: تعیین موقعیت طول باز بلند

۲-۲- طول باز کوتاه [۵] (SBL)

در این روش یک ترانسپوندر در بستر دریا و حداقل سه ترانسدیوسر در زیر شناور سطحی، زیر سطحی قرار دارد (نگاره ۴) که با دریافت سیگنال از ترنسپوندر، اختلاف فاز توسط ترانسدیوسرها، و زمان ارسال سیگنال، محاسبه می‌شود و بدین طریق موقعیت شناور بدست می‌آید. فاصله (baseline) بین ترانسدیوسرهای مستقر در زیر شناور در حدود چند ده مترمی باشد که معمولاً در چهار گوشه شناور قراردارند.



نگاره ۴:تعیین موقعیت طول باز کوتاه

مزایا

■ سیستم، همزمان با پرتاب وسیله متحرک، قابل پیاده سازی و استفاده می‌باشد.

■ همه تجهیزات و عملیات می‌تواند در عرشه کشتی قابل تعمیر و آنالیز قرارگیرد.

■ فقط به یک ترانسپوندر نیاز می‌باشد.

معایب

■ دقت تابعی از عمق می‌باشد (۰/۱٪ تا ۵٪ فاصله مایل)

■ برای کارهای دقیق، به علت وابستگی به عمق، در آب‌های عمیق، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

■ دورانهای شناور باعث کاهش دقت می‌شود.

کاربردها

■ تعیین موقعیت شناور در مناطق کم عمق

■ تعیین موقعیت و ردیابی کردن شناور زیر سطحی یا tow fish

■ کنترل غواص درنزدیکی سازه‌های زیر دریائی

■ خطوط لوله‌های زیر دریائی

■ عملیات لایروبی بستر

هندسه تعیین موقعیت SBL

زمان بین ارسال سیگنال از ترانسپوندر به هر ترانسدیوسر اندازه‌گیری می‌شود، حال اگر در صفحه حرکت شناور آرایش هندسی ترانسدیوسرها (نگاره ۵) به شکل مستطیل به طول و عرض 2a,2b باشد و فاصله اندازه‌گیری شده بین ترانسپوندر و ترانسدیوسرها به ترتیب با R_1,R_2,R_3,R_4 نمایش داده شود، می‌توان مختصات نقطه مجهول یعنی ترانسپوندر نصب شده در زیر دریائی (x,y,z) را به طریق زیر بدست آورد.

$$R_1 = \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}$$
$$R_2 = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}$$
$$R_3 = \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}$$

$$R_4 = \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}$$

$$R_1^2 = (x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2$$

$$R_2^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2$$

$$R_3^2 = (x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2$$

$$R_4^2 = (x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2$$

$$R_3^2 - R_1^2 = 4ax \qquad x = \frac{R_3^2 - R_1^2 - R_4^2 + R_2^2}{8a}$$

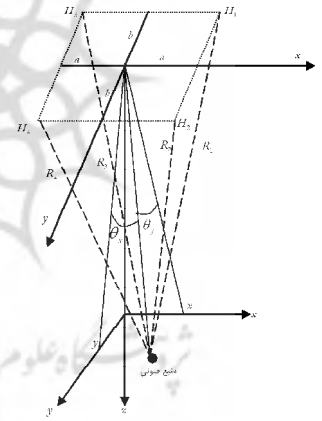
$$R_4^2 - R_2^2 = 4ax$$

$$R_1^2 - R_2^2 = 4by \qquad y = \frac{R_1^2 - R_2^2 + R_3^2 - R_4^2}{8b}$$

$$R_3^2 - R_4^2 = 4by$$

$$z = \frac{1}{4}\sqrt{R_1^2-(x-a)^2-(y+b)^2} + \sqrt{R_2^2-(x-a)^2-(y-b)^2} + \sqrt{R_3^2-(x+a)^2-(y+b)^2} + \sqrt{R_4^2-(x+a)^2-(y+b)^2}$$

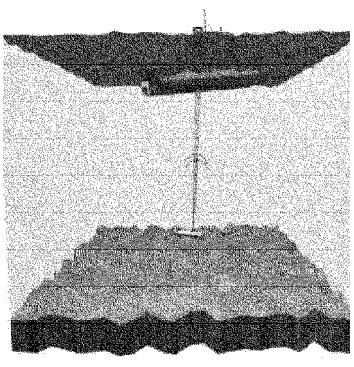
بنابراین همان طور که ملاحظه می‌شود با داشتن سه کمیت اندازه‌گیری شده، می‌توان به سه مجهول رسید و اندازه‌گیری چهارم صرفاً جهت افزایش درجه آزادی و برآورد دقیق از مجهولات می‌باشد.



نگاره ۵- هندسه تعیین موقعیت کوتاه

۲-۳- طول باز خیلی کوتاه[۶]

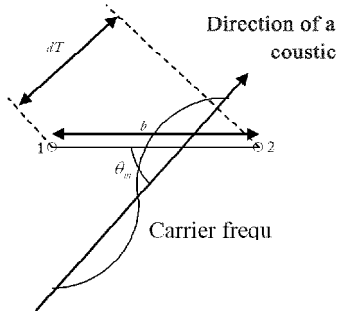
این روش همانند روش قبلی می‌باشد با این تفاوت که فاصله بین آرایه‌های ترانسدیوسر از چندین متر به کسری از سانتیمتر تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر ترانسدیوسر شامل چند سنسور بسیار نزدیک به هم می‌باشد که خط مبنای آن‌ها (Baseline) خیلی به هم نزدیک هستند (نگاره ۶).



نگاره ۶- تعیین موقعیت طول باز خیلی کوتاه

به عبارت دیگر می‌توان گفت که یک ترانسدیوسر با چندین سنسور به کار رفته است و سیگنالهای مربوطه، توسط آرایه‌ای از سنسورها، بوسیله اختلاف فار از همدیگر تشخیص داده می‌شوند، که با اندازه‌گیری دقیق اختلاف فاز، می‌توان ژیزمان ترانسپوندر را محاسبه کرد و پارامتر فاصله بوسیله محاسبه زمان بین دریافت و ارسال سیگنال بدست می‌آید.

مطابق نگاره (۷) فاصله بین ترانسدیوسر (سنسور) ۱ و ۲، b فرض می‌شود ارتباط بین اختلاف فاز سیگنال صوتی و زاویه میکانیکی برخورد[۷] در نگاره ۷ نشان داده شده است.



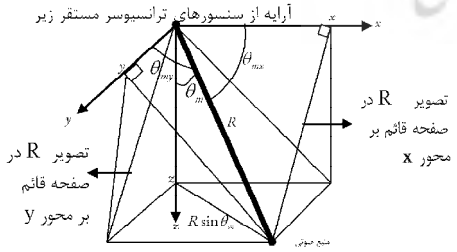
نگاره ۷: رابطه اختلاف و زاویه میکانیکی

سیگنال صوتی فرکانس حامل (f) در زیر آب با سرعت c، با طول مبنا (b) زاویه تقاطع θ_m را می‌سازد. ارتباط بین فاز الکتریکی مشاهده شده[۸] dT (Observed electrical Phase) و زاویه میکانیکی برخورد (θ_m) با رابطه زیر بر قرار می‌شود:

$$dT = k.b.\cos(\theta_m),\ k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

که λ طول موج سیگنال صوتی می‌باشد. از رابطه فوق، مقدار زاویه برخورد بدست می‌آید.

به علت فاصله بسیار کوچک b، عملاً فرض می‌شود سیگنال رسیده از ترانسپوندر به دو سنسور ترانسدیوسر به صورت موازی سیر می‌کند و به سنسورهای ترا سدیوسر می‌رسند، و دو زاویه برخورد در راستای محور x و راستای محور y ایجاد می‌شود یعنی θ_{my} , θ_{mx} (نگاره ۸)



نگاره ۸: هندسه فاصله در طول باز خیلی کوتاه

$$R^2\sin^2\theta_m = R^2\cos^2\theta_{mx} + R^2\cos^2\theta_{my}$$

$$R^2\sin^2\theta_m + h^2 = R^2$$

$$R = \frac{h}{\sqrt{1-\cos^2\theta_{mx} - \cos^2\theta_{my}}}$$

مختصات x,y,z شناور از طریق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$x= R.\cos\theta_{mx}\ ,y= R\ \cos\theta_{my}\ ,z= h= R\ \sqrt{1-\cos^2\theta_{mx}-\cos^2\theta_{my}}$$

مزایا

- هزینه ساخت سیستم نسبت به روش‌های دیگر پائین می‌باشد.
- در عملیات دینامیکی کاربرد دارد.

معایب

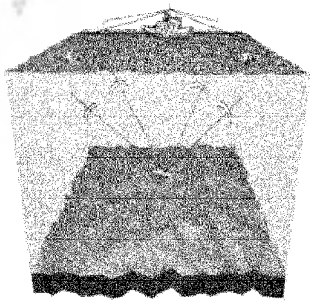
- برای اعماق کمتر از ۵۰۰ مترکاربرد دارد
- در آب‌های گل آلود و با نویز محیطی کاربرد چندانی ندارد
- شناور باید همیشه بالای ترانسپوندر باشد
- نیاز به کالیبراسیون دارد.

کاربرد

- برای تعیین موقعیت کردن مختصات ترانسپوندر روش LBL
- برای تعیین موقعیت کردن AUV, ROV, tow fish

۲-۴- بویه‌های هوشمند[۹] GPS

علاوه بر روش‌های فوق، روش GIB، متکی بر بویه‌های شناور، گیرنده GPS و دستگاه فرستنده‌های صوتی می‌باشد. شناور زیر سطحی مجهز به فرستنده صوتی، که با ارسال سیگنال به سوی بویه، و محاسبه زمان ارسال و دریافت توسط بویه، فاصله بین آن دو بدست می‌آید. (نگاره ۹) برای افزایش دقت تعیین موقعیت می‌توان تعداد بویه‌ها را افزایش داد که با استفاده از سطوح موقعیت کروی[۱۰] به مرکز گیرنده، موقعیت شناور زیر سطحی بدست می‌آید. بنابراین اگرتعداد کافی بویه وجود داشته باشد موقعیت آنی بدست می‌آید.



نگاره ۹: تعیین موقعیت بویه‌های هوشمند

مزایای سیستم

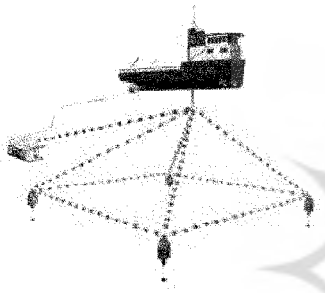
- این سیستم تنها سیستمی می‌باشد که به طور آنی[۱۱] (Real Time)، موقعیت تارگت را ردیابی می‌کند.
- تعیین موقعیت دقیق
- بکارگیری و پیاده کردن ساده آن
- بکارگیری آن برای تعیین MSL منطقه‌ای [1]
- استفاده از آن برای سیستم‌های هشدار دهنده سونامی [2]

معایب

- وابستگی به سیستم GPS برای کارهای مستقل از GPS
- عدم همزمانی ساعت‌ها
- استفاده در یک منطقه از پیش تعیین شده به عبارت دیگر برای هر منطقه باید پوشش بویه‌ها مناسب باشد.

۲-۵- طول باز ترکیبی بلند و خیلی کوتاه[۱۲] LUSBL

این سیستم حالت خاصی از USBL می‌باشد که آرایش هندسی ترانسپوندرهای آن ترکیبی از دو سیستم LBL , USBL می‌باشد (نگاره ۱۰)



نگاره ۱۰: تعیین موقعیت ترکیبی

۳- ارزیابی انواع سیستم‌ها در دریای عمان و خلیج فارس

علی رغم این که آب‌های خلیج فارس و دریای عمان به هم متصل هستند و توسط جریانهای جزر و مدی، جریانات چرخشی و... در حال تبادل هستند، بااین حال این دو پهنه آبی از دیدگاههای مختلف بوم‌شناسی به عنوان دو اکوسیستم متفاوت محسوب گشته و خصوصیات آن‌ها از قبیل عمق، درجه حرارت، شوری و مواد مغذی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. دریای عمان و خلیج فارس دو منطقه استراتژیک برای یک کشور محسوب می‌شوند و در آن‌ها عملیات مختلفی از قبیل لوله گذاری در بستر، عملیات و مانورهای نظامی، نصب سکوهای دریائی، و... انجام می‌گیرد. بنابراین داشتن سیستمی که بتوان امور فوق را مورد موقعیت و مکان یابی قرار داد حائز اهمیت می‌باشد.

لذا در این مقاله روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و متناسب با معایب و مزایای هرکدام، می‌توان آن‌ها را در دو منطقه مورد نظر یعنی دریای عمان و خلیج فارس پیاده کرد. به عنوان مثال خلیج فارس جزء نقاط کم عمق با عمق متوسط ۳۰ متر می‌باشد لذا برای تعیین موقعیت کردن وسایل زیر سطحی نظیر[۱۳] ROV، AUV و... می‌توان از روش SBL، USBL استفاده کرد. ولی در دریای عمان به علت عمق زیاد می‌توان روش LBL, GIB را مورد استفاده قرار داد، ولی استفاده از این دو روش فقط در آب هایی که متعلق به کشور ایران است ممکن می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

۱- در آب‌های کم عمق، نویز ناشی از امواج متفرقه نسبت به نویز موجود در آب‌های عمیق بیشتر است، پس دقت USBL در آب‌های کم عمق کاهش می‌یابد.

۲- در آبهائی که دامنه جزر و مد زیاد است نمی‌توان از روش‌های USBL , SBL استفاده کرد زیرا جزو مد باعث ایجاد خطا در موقعیت می‌شود.

۳- در سیستم LBL به علت مراحل متعدد انتقال اطلاعات بین تراسپوندر وترانسدیوسر، از امنیت اطلاعات کاسته می‌شود.

۴- سیستم SBL همزمان به یک شناور بالای شناور زیر سطحی نیاز دارد که ممکن است نویز این شناور، کار سیستم را مختل کند، در حالی که در سیستم GIB چنین وضعیتی وجود ندارد.

۵- دامنه جزر و مد در خلیج فارس نسبت به دریای عمان بیشتر است لذا میزان خطای جزر ومد در خلیج فارس بیشتر است و روش‌های سطحی نظیر SBL, USBL برای شناورهای سطحی برای کارهای دقیق مناسب نمی‌باشد.

۶- SBL در آب‌های عمیق نظیر دریای عمان، نیاز به طول بازه‌های بزرگ دارد (بزرگتر از ۴۰ متر) و از آنجائی که دقت آن تابعی از عمق می‌باشد بنابراین دقت آن در آب‌های عمیق نسبت به آب‌های کم عمق کاهش می‌یابد.

۷- اگر جابجائی افق شناور سطحی زیاد باشد از دقت روش‌های USBL, SBL کاسته می‌شود.

۸- در سیستم LBL نیاز به حداقل سه ترانسپوندر می‌باشد که فاصله بین آن‌ها چندین کیلومتر است. بنابراین برای مناطق بزرگ قابل استفاده می‌باشد.

۹- خلیج فارس دارای تلاطم‌های شدیدتری در سطح آب، نسبت به دریای عمان می‌باشد بنابراین نمی‌توان در کارهای دقیق از روش‌های SBL, USBL استفاده کرد زیرا در این روش تکان‌های وارده به شناور از طرف نیروی سطحی آب، باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود.

۱۰- همچنین در سیستم‌های LBL هنگامی که اندازه پارامتر عمق نسبت به فاصله عرضی یا طولی کم باشد، این پارامتر با خطای زیادی محاسبه می‌گردد در حالی که در سیستم‌های GIB درون هیدروفون واحد زیر سطحی، عمق سنج هائی قرار داده شده که اطلاعات مربوط به عمق را ارسال می‌نماید و به این ترتیب عمق با دقت بسیار بالائی بدست می‌آید.

۱۱- دوران‌های شناور بر روی صحت اندازه‌گیری‌های سیستم SBL بسیار مؤثر است، در فاصله یک کیلومتر، سیستم SBL هدف را به صورت هاله‌ای ابری نمایش خواهد داد، در حالی که در سیستم GIB، هدف به وضوح نمایش داده می‌شود.

۵- منابع و مآخذ

۱-روش جدید اندازه‌گیری تغییرات سطح آب دریا، با استفاده از امواج اکوستیکی به عنوان مکمل روش‌های موجود ع. آ اردلان، ع حاجی زاده، م. ترابی، دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی ۱۳۸۶.

۲-سیستم هشدار دهنده آکوستیکی سونامی. ع. آ.اردلان، ع. حاجی زاده، الف. قره باغی، دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی ۱۳۸۶.

۳-روش‌های غیرفعال تعیین موقعیت زیر دریائی‌های نظامی، ع. آ.اردلان -ع. حاجی زاده، دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی ۱۳۸۶.

4- Milne, P.H. (1980). Underwater Engineering Surveys

5- Jong C.D; G.Lachapelle. (2002) Hydrography

6- Alcocer A., Oliveira P. (2006) Underwater Acoustic Positioning Systems based

On Buoys With GPS

7- William J. Kirkwood, Sheri N. White, (2002). Precision Underwater Positioning

8- Seafloor Positioning System With GPS-acoustic, (2000). Koichiro Obana, Hiroshi Katao,

9- M.B.Larsen Autonomous Navigation of Underwater Vehicles

10- H.G. Thomas. GIB Buoys: An interface between space and depths of the Oceans

11- K. Vickery . (1998) Acoustic Positioning Systems

12- James C.Kinsey, Student member, IEEE and Louis L. Whitcomp, Senior Member, IEEE, Underwater Vehicle Navigation: Theory and Experiment.

13- Geff Wright, Tony Bamford, (2002), Advanced long Baseline Acoustics for Precise Deep Water Structure Mating

پی‌نوشت

1- Long Baseline (LBL)

2- Transducer

3- Transponder

4- Baseline

5- Short Baseline (SBL)

6- Ultra Short Baseline (USBL) or Super Short Baseline (SSBL)

7- Mechanical angle of incidence

8- Observed electrical Phase

9- GIB (GPS Intelligent Buoy)

10- Surface of Position

11- Real Time

12- LUSBL (Long Ultra Baseline)

13- Rov (Remotely Operated Vehicle)- AUV (Autonomous Underwater Vehicle