

بسم الله الرحمن الرحيم

۱- مقدمه

قیمت ارزان، پیاده سازی گسترده و امکان محاسبه موازی از مزایای بی شمار شبکه های سنسور هستند. در عین حال هر گره در این نوع شبکه ها، از محدودیت های بسیاری از جمله توان و ارتباطات محدود برخوردار است. کاربردهای متعددی از شبکه های سنسور در زمینه های مختلف قابل مشاهده است، که می توان به مصارف نظارتی، پزشکی و نظامی اشاره کرد. سنسورها می توانند خرابی یک دستگاه در کارخانه را به مرکز کنترل اعلام کنند یا اینکه در مناطقی با پوشش گیاهی فراوان که امکان دسترسی دشوار است با مشاهده دود، خبر شروع یک آتش سوزی را به مرکز نظارتی اعلام کنند.

طبیعتاً، اولین سوالی که مطرح می شود این است که این وقایع در کجا اتفاق افتاده اند؟ برای پاسخ به این سوال لازم است که سنسور اطلاعات لازم را در مورد موقعیت خود داشته باشد. همچنین در شبکه های گسترده Ad Hoc، دانستن موقعیت گره ها می تواند در مسیریابی مفید واقع گردد [۳] و [۴]. کاربردهای متعدد دیگری را نیز در این می توان در [۲] مشاهده کرد. متأسفانه راه حل مستقیم استفاده از GPS بنا به دلایل زیر در گره های شبکه، عملی نخواهد بود.

- GPS در محیط های بسته و مناطقی با پوشش گیاهی فراوان قابل استفاده نیست.
- استفاده از GPS عمر باتری ترمینال ها را کم می کند که خود در عین حال عمر عملکرد شبکه را کاهش می دهد.
- ابعاد GPS و آنتن آن، اندازه ترمینال را افزایش می دهد که خود با این مساله که ابعاد سنسورها می بایستی به قدری کوچک باشد تا مسدود کننده ارتباط برای سایر ترمینال ها نباشد، در تناقض است.

لذا روشهای متعددی پیشنهاد گردیده است تا بتوانند امکان اطلاع گره های سنسور از موقعیت خودشان را با هزینه کمتر، در هر نوع محیطی بدون نیاز به زیر ساخت خاصی (البته در برخی از موارد) فراهم کنند.

۲- روشهای موقعیت یابی

اطلاعات موقعیت گره ها می تواند به صورت نسبی یا مطلق مطرح گردد. در صورت استفاده از دستگاه مختصات مطلق، چند anchor یا مرجع مورد نیاز است (برای سیستمهای ۲ بعدی حداقل سه تایی آنها مورد نیاز است). مرجع ها در واقع گره هایی از شبکه هستند که مختصات خود را در دستگاه مختصات مطلق می دانند از اصطلاحات استفاده شده دیگر برای مرجع می توان beacons و یا landmarks را نام برد.

۳ روش اصلی برای محاسبه موقعیت یک گره در شبکه وجود دارد. استفاده از اطلاعات گره های همسایه (Proximity)، استفاده از قضایای هندسی مانند triangulation، trilateration، و بررسی و تجزیه تحلیل مشخصات موقعیت در مقایسه با اطلاعات جمع آوری شده از قبل که به آن scene analysis می گویند.

۲-۱- Proximity

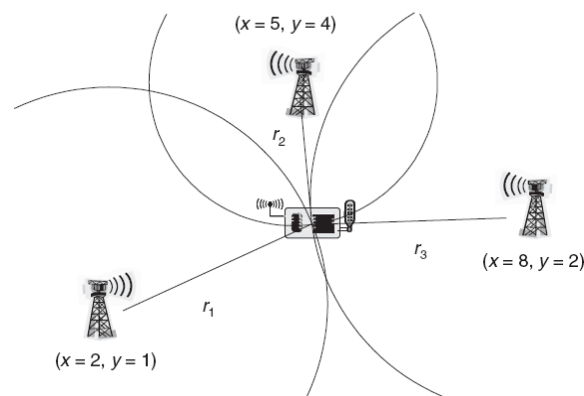
در صورتی که گره های مرجع ، مختصات مطلق خود را توسط سیگنالهای رادیویی ارسال کنند، با توجه به آنکه برد این سیگنالها کوتاه است ؛ گره های نزدیک به یک مرجع می توانند موقعیت تقریبی خود را با استفاده از اطلاعات ارسالی از طرف گره مرجع ، بدست آورند. با توجه به این که اطلاعات دریافتی تا حدودی کلی می باشد، در برخی از موارد می تواند بسیار مفید واقع گردد. مثلاً با توجه به ماهیت ذاتی امواج مادون قرمز که توسط دیوار محدود می شوند ، یک گره می تواند از این که در کدام اتاق قرار دارد مطلع گردد.

در صورتی که یک گره بتواند از چندین مرجع اطلاعات مربوط به مختصات آنها را دریافت کند ، می تواند با استفاده از محاسباتی مختصات مطلق خود را تخمین بزند که در ادامه به آن اشاره خواهیم کرد.

۲-۲- Triangulation و Trilateration

ارتباط مخابراتی بین دو گره می تواند موقعیت جغرافیایی آنها را نیز نسبت به هم مشخص کند، برای نمونه فاصله میان دو گره یا زوایایی که نسبت به یک مرجع واحد با یکدیگر می سازند می تواند موقعیت آنها را نسبت به هم مشخص کند. با استفاده از این اطلاعات مقدماتی می توان با دقت خوبی به موقعیت مطلق آنها دست پیدا کرد. هنگامی که از فاصله بین موجودیت ها^۱ استفاده شود به این روش Trilateration گویند و هنگامی که از زاویه استفاده شود بدان Angulation می گویند. برای استفاده از روش Trilateration در یک صفحه لازم است یک گره فاصله دقیق خود را با (حداقل) ۳ مرجع داشته باشد. با استفاده از این ۳ فاصله یک گره می تواند محل تلاقی مکان هندسی نقاطی را که از هر یک از مرجع ها به همان فاصله از گره مذکور هستند بدست آورد. (شکل ۱). ولی با توجه به اینکه اندازه گیری فاصله در روش های موجود هیچگاه بی نقص نیست لذا نقطه برخورد نیز در این حالت منحصر به فرد نخواهد بود و می تواند تشکیل یک ناحیه را بدهد. برای حل این مشکل می توان از تعداد بیشتری مرجع استفاده کرد که به مسئله Multilateration می انجامد. این روش یک روش پایه است که در بسیاری از روش های مورد بحث در این مقاله نیز از آن استفاده می شود. توضیحات ریاضی این روش نیز در قسمت ۳ آورده شده است.

روش Angulation نیز بر این اساس است که در یک مثلث هنگامی که فاصله زوایای دو رأس معین باشد ، می توان رأس سوم را از تلاقی دو ضلع باقی مانده محاسبه کرد. مشکل عدم دقت کافی در اندازه گیری های انجام شده در این روش با استفاده از اندازه گیری های متعدد قابل حل خواهد بود.



شکل ۱ - Trilateration با استفاده از ۳ مرجع

¹ entities

تعیین فاصله

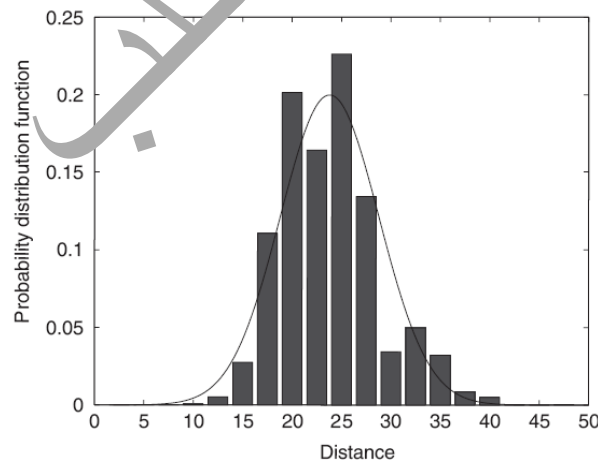
برای استفاده از Multilateration، تخمینی از فاصله گره تا تعدادی از گره های مرجع مورد نیاز است. روشهای متعددی برای تعیین فاصله وجود دارد که می توان به 1RSSI ، 2ToA و 3TDoA اشاره کرد.

RSSI

با فرض اینکه توان سیگنال ارسالی P_{tx} ، مدل افت مسیر⁴ و ضریب افت مسیر α مشخص هستند. گیرنده می تواند از توان سیگنال دریافتی P_{rcvd} برای محاسبه فاصله d بین خودش و فرستنده، استفاده کند. روش کار بقرار زیر است.

$$P_{rcvd} = c \frac{P_{tx}}{d^\alpha} \Leftrightarrow d = \sqrt[\alpha]{\frac{cP_{tx}}{P_{rcvd}}}$$

از آنجا که این روش نیازی به سخت افزار اضافی ندارد و همچنین فاصله براحتی و بدون نیاز به هماهنگی و ارسال سیگنالهای اضافی بدست می آید روش مناسبی به نظر می رسد. البته اشکال این روش آن است که مقادیر RSSI ثابت نیستند، حتی اگر فرستنده و گیرنده نیز ثابت باشند و حرکت نکنند مقدار توان دریافتی دائم در حال تغییر است. این مسأله به خاطر حضور fast fading و حرکت اجزای کانال است. در [5] خطاهای $\pm 50\%$ نیز ذکر شده است که البته می توان با استفاده از ارسال مکرر احتمال خطا را کاهش داد. خطای دیگر می تواند ناشی از حضور موانع و مسئله فیدینگ Multipath باشد، در صورتی که سیگنال دریافتی به خاطر وجود موج و عدم سیر در مسیر مستقیم نسبت به سیگنالی که به صورت مستقیم در صورت عدم وجود موانع دریافت می شد، تضعیف بیشتری را تحمل شده باشد، به اشتباه فاصله بیشتری تخمین زده خواهد شد و در این حالت ارسال مکرر نیز خطا را کاهش نخواهد داد. البته عدم کالیبره بودن دستگاهها را نیز نمی توان نادیده گرفت. با بررسی های انجام گرفته در [6] نشان داده شده است مقادیر اندازه گیری شده RSSI برای فواصل یک فرآیند تصادفی است (شکل ۲).



شکل ۲- تابع چگالی احتمال فاصله با فرض دانستن مقدار RSSI

از این روش هنگام استفاده از RSSI بعنوان روشی برای تعیین فاصله، می بایستی بتوانیم درصدی از خطا را بپذیریم.

¹ Received Signal Strength Indicator

² Time of Arrival

³ Time Difference of Arrival

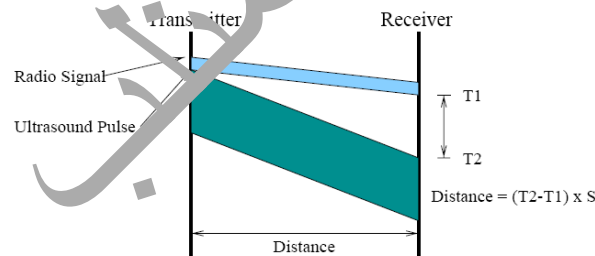
⁴ Path loss

ToA

زمان ورود یا همان ToA که در برخی از متون به آن Time of Flight نیز می‌گویند روشی است که در آن از رابطه بین فاصله و زمان ارسال سیگنال، در صورت دانستن سرعت انتشار می‌توان استفاده کرد. با فرض آنکه فرستنده و گیرنده زمان شروع ارسال را می‌دانند، با استفاده از زمانی که طول می‌کشد سیگنال از لحظه شروع به گیرنده برسد t و سرعت انتشار سیگنال v می‌توان فاصله بین دو گره را به صورت $d = v.t$ محاسبه کرد. از آنجا که نیاز است بین فرستنده و گیرنده سنکرون سازی دقیقی صورت گیرد، لذا در صورت سنکرون نبودن فرستنده و گیرنده خطای اندازه‌گیری رخ خواهد داد، از اشکالات دیگر این روش آن است که سرعت انتشار بسته به محیط متفاوت عمل می‌کند و لذا شرایط محیطی بر اندازه‌گیری تأثیر گذار خواهد بود.

TDoA

برای غلبه بر مشکل سنکرون سازی، روش اختلاف زمان ورود یا TDoA معرفی گردید، در این روش که از دو سیگنال با سرعت‌های متفاوت برای اندازه‌گیری فاصله استفاده می‌شود روش کار بدین صورت است که مثلاً برای دو سیگنال رادیویی یکی با سرعت ماوراء صوت و دیگری با سرعت نور، ابتدا سیگنال با سرعت بیشتر (سرعت نور) برای سنکرون سازی ارسال می‌شود، سپس بلافاصله پس از اتمام ارسال سیگنال اول، سیگنال دوم که سرعت کمتری دارد ارسال می‌شود، در طرف گیرنده پس از دریافت کامل سیگنال اول تایمر گیرنده لحظه دریافت سیگنال دوم شروع به شمارش می‌کند، در این صورت زمان نشان داده شده در تایمر برابر زمان انتشار موج دوم خواهد بود که سرعت آن را از قبل می‌دانند، و براحتی از این طریق فاصله را محاسبه می‌کند. (شکل ۳)



شکل ۳- اندازه‌گیری فاصله با استفاده از روش TDoA

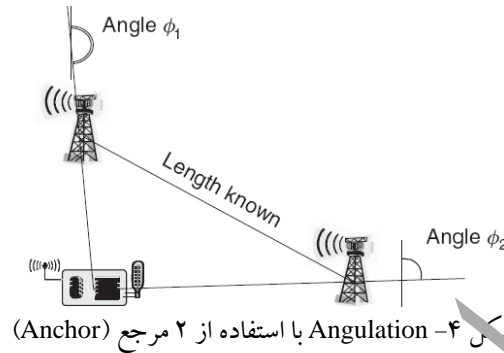
اشکال آشکار این روش استفاده از دو فرستنده و گیرنده است. ولی از روشهایی که تاکنون برای تخمین فاصله گفته شد، دقیق‌تر عمل می‌کند. این روش و گونه‌های دیگر این روش در مقالات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که توانسته‌اند با این روش به دقت ۲cm دست یابند [۲].

البته بایستی این نکته را در نظر داشت که بین میزان خطای اندازه‌گیری و هزینه، یک tradeoff وجود دارد. مثلاً روش TDoA در مقابل RSSI از دقت بسیار بالاتری برخوردار است حال آنکه تجهیزات سخت‌افزاری و پیچیدگی آن به مراتب بیشتر خواهد بود.

¹ Ultrasound

اندازه گیری زاویه

روش دیگر اندازه گیری فاصله ، استفاده از اندازه گیری زاویه است. این زاویه می تواند زاویه مابین خط واصل گره با anchor نسبت به یک جهت مرجع^۱ مثلاً صفر درجه شمالی باشد. (شکل ۴).



در روش های قدیمی اندازه گیری، زاویه را با استفاده از آنتنهای جهت دار مدور همانند ایستگاههای رادار اندازه گیری می کردند. روش دیگر، استفاده از چندین آنتن نصب شده با فواصل معین بر روی سنسور است که در این حالت از اختلاف زمانی سیگنال دریافت شده توسط این آنتنها جهت سیگنال ارسال شده محاسبه می گردد [۸]. هر چه اندازه و فواصل این آنتنها از یکدیگر کمتر باشد، جهت اندازه گیری شده دقیق تر خواهد بود. از آنجا که این راه حل بسیار پر حجم است و گران تر از روشهای یاد شده تمام می شود. معمولاً از آن کمتر استفاده می شود.

۳-۲- Scene Analysis

با توجه به نیازمندیهای این روش مبنی بر داشتن حافظه کافی برای نگهداری اطلاعات گذشته برای بررسی وضعیت فعلی سیستم، معمولاً از این روش برای شبکه های سنسور استفاده نمی شود. RADAR برای موقعیت یابی در داخل ساختمان طراحی شده است، از این روش استفاده کرده است [۹].

۳-۳- اصول ریاضی روش Multilateration

روش Lateration در بسیاری از الگوریتم های موقعیت یابی استفاده می گردد. در این قسمت به بررسی اصول ریاضی این روش می پردازیم.

۳-۱- تحلیل ریاضی با استفاده از ۳ مرجع با مقادیر فاصله صحیح

فرض کنید ۳ مرجع با مختصات (x_i, y_i) در اختیار داریم که در آن $i = 1, 2, 3$ ، گره ای با مختصات نامعلوم (x_u, y_u) فاصله دقیق خود را تا هر یک از مرجع ها به اندازه r_i در اختیار دارد. با استفاده از قضیه فیثاغورث برای هر یک از ۳ مرجع خواهیم داشت:

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = r_i^2, i = 1, 2, 3$$

¹ reference

برای حل این معادله بهتر است دسته معادلات خطی بر حسب x_u و y_u را بنویسیم. برای انجام این عمل لازم است مقادیر x_u^2 و y_u^2 را حذف کنیم. این کار را می توان با کسر کردن معادله سوم از دو معادله قبلی انجام داد:

$$\begin{aligned}(x_1 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2 &= r_1^2 - r_3^2 \\(x_2 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2 &= r_2^2 - r_3^2\end{aligned}$$

پس از مرتب سازی معادلات:

$$\begin{aligned}2(x_3 - x_1)x_u + 2(y_3 - y_1)y_u &= (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\2(x_3 - x_2)x_u + 2(y_3 - y_2)y_u &= (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2)\end{aligned}$$

که به راحتی می تواند به صورت یک ماتریس خطی بیان گردد:

$$2 \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix}$$

ماتریس سمت راست و ماتریس سمت چپ دارا مقادیر معلوم هستند و از این طریق (x_u, y_u) به راحتی بدست می آیند.

۳-۲- تحلیل با استفاده از مقادیر تخمین زده شده برای فاصله

چالش اساسی در روش trilateration هنگامی بوجود می آید که مقادیر فاصله دقیق نباشند، در این صورت مقادیر اندازه گیری شده با مقدار خطای ε_i همراه هستند. لذا برای مقادیر اندازه گیری شده \tilde{r}_i خواهیم داشت $\tilde{r}_i = r_i + \varepsilon_i$. بطور شهودی مشخص است که برای داشتن پاسخ دقیق نیازمند تعداد بیشتری هستیم تا بتوانیم خطای اندازه گیری را کاهش دهیم در این حالت یک معادله Overdetermined خواهیم داشت.

$$2 \underbrace{\begin{bmatrix} x_n - x_1 & y_n - y_1 \\ \dots & \dots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} (r_1^2 - r_n^2) - (x_1^2 - x_n^2) - (y_1^2 - y_n^2) \\ \dots \\ (r_{n-1}^2 - r_n^2) - (x_{n-1}^2 - x_n^2) - (y_{n-1}^2 - y_n^2) \end{bmatrix}}_b$$

برای چنین دسته معادلات خطی overdetermined، روشی برای می نیم کردن خطای میانگین مربعات^۱ وجود دارد. در واقع زوج (x_u, y_u) مقدار $\|Ax - b\|_2$ را می نیم می کنند که برای هر ماتریس v رابطه $\|v\|_2^2 = v^T v$ برقرار است. از این رو خواهیم داشت:

$$\|Ax - b\|_2^2 = (Ax - b)^T (Ax - b) = x^T A^T Ax - 2x^T A^T b + b^T b$$

می نیم کردن عبارت بالا به منزله می نیم کردن خطای میانگین مربعات خواهد بود. لذا با صفر قراردادن گرادیان تابع بر حسب x خواهیم داشت:

¹ Minimum Mean square error

$$2A^T Ax - 2A^T b = 0 \Leftrightarrow A^T Ax = A^T b$$

در صورتی که A از مرتبه کامل باشد این معادله دارای جواب یکتا خواهد بود، روش های متعددی برای حل آن وجود دارد که معروفترین آنها Cholesky است. نمونه مثالهایی برای این معادلات در [۱] موجود است. این امکان وجود دارد که با تعمیم روش فوق، تخمین پارامترهای دیگر مسأله را بهبود بخشید [۲]. در این روش که Atomic Multilateration نام دارد در صورتی که چهار مرجع یا بیشتر برای تخمین موقعیت گره موجود باشد و همچنین از روش TD0A برای تخمین فاصله استفاده کرده باشیم، می توان سرعت ultrasound را نیز در محیط تخمین زد. خطای فاصله اندازه گیری شده بین گره ای با مختصات نامعلوم (x_u, y_u) و مرجع i ام (x_i, y_i) را می توان اختلاف فاصله اندازه گیری شده با فاصله اقلیدسی تخمین زده شده دانست:

$$f_i(x_u, y_u, s) = st_{iu} - \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2}$$

که در آن t_{iu} زمان انتشار موج ultrasound از مرجع i ام به گره u و s سرعت تخمینی انتشار موج ultrasound است. در صورتی که تعداد مرجع های موجود و تخمین فواصل آنها کافی باشد با استفاده از روش گفته شده و پس از مرتب سازی معادلات ماتریس A و b به فرم زیر در خواهند آمد.

$$2 \underbrace{\begin{bmatrix} x_n - x_1 & y_n - y_1 & t_{nu}^2 - t_{n1}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} & t_{nu}^2 - t_{n(n-1)}^2 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ s^2 \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} -(x_1^2 - x_u^2) - (y_1^2 - y_u^2) \\ \dots \\ -(x_{n-1}^2 - x_u^2) - (y_{n-1}^2 - y_u^2) \end{bmatrix}}_b$$

که در آن $x = (A^T A)^{-1} A^T b$ مانند قبل بدست خواهد آمد. البته این نکته حائز اهمیت است که در صورتی که ۳ مرجع بر روی یک خط قرار داشته باشند، نمی توان از روش فوق استفاده کرد و لازم است از روش دیگری به نام Multilateration مشارکت [۲] استفاده نمود که در ادامه به آن اشاره خواهیم کرد.

۴- مکان یابی Single Hop

در این قسمت تمکز بیشتر معطوف به سیستم هایی است که در آن، گره ای با مختصات نامعلوم بتواند بطور مستقیم با مرجع ها ارتباط برقرار کند و در واقع بین مرجع و گره مذکور تنها یک گام فاصله وجود داشته باشد.

Active Badge

این سیستم اولین سیستم طراحی شده برای مکان یابی دستگاههای ساده قابل حمل درون ساختمان است. یک Badge بطور مرتب شناسه منحصر بفرد خود را توسط امواج مادون قرمز ارسال می کند. حداقل در هر اتاق یک گیرنده قرار دارد، اطلاعات دریافت شده به سرور مرکزی رفته و از آنجا مشخص است که هر دستگاه در کدام اتاق قرار دارد. [۱۰]

¹ Collaborative Multilateratio

Active Office

در این سیستم گیرنده های ultrasound در مکانهای مشخصی از جمله سقف اتاق نصب شده اند، در این حالت دستگاهی که موقعیت آن قرار است تشخیص داده شود به صورت فرستنده ultrasound عمل می کند. هنگامی که قرار است موقعیت دستگاهی تشخیص داده شود، کنترلر مرکزی پیغام رادیویی را که حاوی آدرس دستگاه است ارسال می کند، دستگاه مذکور به محض دریافت سیگنال، یک پالس ultrasound کوتاه می فرستد. این پالس توسط آرایه ای از گیرنده ها دریافت می شود. هر گیرنده پس از ثبت زمان دریافت پالس، تفاوت این زمان را با زمان ارسال سیگنال رادیویی محاسبه می کند. با استفاده از این زمان، هر گیرنده با استفاده از روش TDoA، فاصله خودش را با دستگاه مذکور تخمین می زند و سپس در کنترلر مرکزی با استفاده از Multilateration مکان دستگاه تشخیص داده می شود. ارسال سیگنال رادیویی هر ۲۰۰ms یکبار صورت می گیرد و این امکان را به دستگاه می دهد که در اکثر زمان به حالت sleep باشد در [۱۱] نشان داده شده است که با استفاده از این روش در ۹۵٪ موارد موقعیت تخمین زده شده در ۸cm مکان واقعی بوده است.

RADAR

سیستم معرفی شده در [۹] نیز برای مکان یابی داخل ساختمان استفاده می شود. جنبه قابل توجه این روش استفاده از تکنیک scene analysis است. این کار را با مقایسه بین مشخصات سیگنال دریافت شده از چند مرجع و مقادیر مشخصات ذخیره شده قبلی انجام می دهد ولی همانطور که گفته شد با توجه به میزان پیچیدگی آن در سیستم های عملی استفاده نمی شود.

Cricket

در روش Active Badge و Active Office، بر ساخت^۱ سیستم مکان دستگاه را مشخص می کند اما در این روش هر دستگاه بصورت مستقل مکان خود را محاسبه می کند. این روش نیز مانند روشهای سابق با استفاده از مرجع های موجود پراکنده در ساختمان کار می کند با این تفاوت که این مرجع ها به فرستنده برد گیرنده، گره هایی هستند که در ادبیات cricket به آنها listener گفته می شود. هدف از روش cricket دادن مشخصات دقیق به گیرنده ها نیست بلکه بیشتر می خواهد به گیرنده ها بگوید در چه محدود ای قرار دارند (تقریباً در فضای محدود ۱m در ۱m). اساس کار بوسیله TDoA است که گیرنده را از این که به کدام مرجع نزدیک تر است آگاه می کند. برای جلوگیری از برخورد در بسته های TDoA، در Cricket هر مرجع به صورت مستقل و تصادفی ارسال اطلاعات را انجام می دهد. همچنین گیرنده از یک الگوریتم decoding برای مقابله با ultrasound multipath و تداخل های RF بهره می گیرد. [۷]

Overlapping Connectivity

این روش برای محیط های بیرونی و بدون نیاز به اندازه گیری فاصله تا مرجع طراحی شده است. در این روش هر گره مختصات خود را تنها با مشاهده امکان ارتباط با گره های مرجع بدست می آورد بدین صورت که اگر یک گره در محدوده پوشش رادیویی یک مرجع وجود داشت مختصات آن را در نظر می گیرد، این کار را برای تمامی مرجع هایی که در محدوده رادیویی آنها قرار دارد انجام می دهد، سپس با گرفتن میانگین از مختصات آنها، مختصات خود را تخمین می زند. البته در این روش فرض می شود که تمامی مرجع ها با یک توان ارسال می کنند و پترن آنها بصورت همه جهته و به شکل کروی است. تخمین مختصات به صورت زیر است:

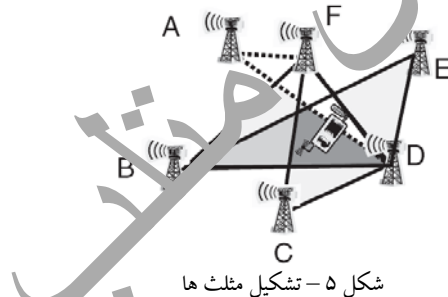
$$(x_u, y_u) = \left(\frac{x_1 + \dots + x_n}{n}, \frac{y_1 + \dots + y_n}{n} \right)$$

¹ Infrastructure

که در آن x_1 تا x_n و y_1 تا y_n به ترتیب مختصات طولی و عرضی مرجع هایی هستند که گره مذکور در محدوده پوششی آنها قرار دارد. دقت این محاسبه به تعداد مرجع ها بستگی دارد هر چه تعداد مرجع ها بیشتر باشد دقت پاسخ بهتر خواهد شد. در صورتی که مرجع ها به صورت یکنواخت و منظمی چیده شده باشند در ۹۰٪ مواقع دقت نسبی برابر یک سوم فاصله میان دو مرجع خواهد بود. لازم به ذکر است در صورتی که پترن پوشش رادیویی به صورت کروی نباشد دقت پاسخ کم خواهد بود. همچنین برای کاهش خطای تصمیم گیری می بایستی محدوده ارسال درست انتخاب شود. تا تعداد گره هایی که در یک محدوده های رادیویی مشابه قرار دارند زیاد نشود. پس از ارائه این روش در [۱۲] نویسنده آن در [۱۳] یک الگوریتم جدید به نام HEAP را به کار قبلی خود اضافه کرد که در این روش با اضافه کردن تعدادی مرجع خطای تخمین کاهش می یابد.

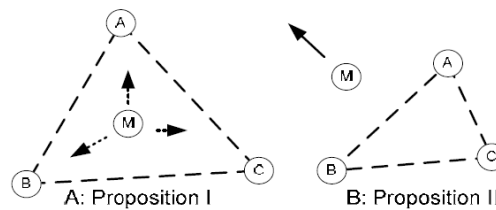
APIT^۱

این روش همانند روش قبل بدون نیاز به اندازه گیری فاصله تا مرجع عمل می کند. الگوریتم APIT تخمین محل گره را با استفاده از همپوشانی تعداد مثلث های ممکن انجام می دهد. رأس های این مثلث ها در واقع مرجع هایی هستند که گره مذکور امکان دریافت سیگنال رادیویی از آنها را دارد (شکل ۵). روش کار بدین صورت است که سنسور هر بار، ۳ انتخاب از مرجع هایی که سیگنال آنها قابل دریافت است را در نظر می گیرد، سپس آزمایش می کند که در مثلث تشکیل شده حاصل، قرار دارد یا خیر و این کار را تا پایان انتخاب سه تایی های موجود ویا رسیدن به حد نصاب دقت لازم انجام می دهد. پس از اتمام، مرکز ثقل شکل حاصل از تلاقی مثلث ها را محاسبه کرده و آن را بعنوان تخمین موقعیت خود در نظر می گیرد.



برای تشخیص آنکه گره M درون مثلث ΔABC قرار دارد یا خیر دو قضیه وجود دارد (شکل ۶):

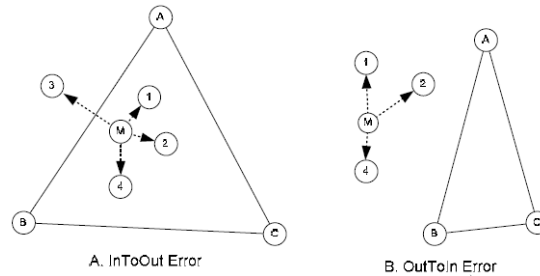
- قضیه ۱: اگر گره M درون مثلث ΔABC قرار داشته باشد، هرگاه M به هر جهتی جابجا شود، موقعیت جدید بایستی نزدیک تر (دورتر) از حداقل یکی از رأس ها شود.
- قضیه ۲: اگر گره M خارج از مثلث ΔABC قرار داشته باشد، با جابجا شدن M ، حداقل یک جهت وجود دارد که در راستای آن M به تمام رأس های مثلث نزدیک و یا از آنها دور می شود.



شکل ۶ - قضایای ۱ و ۲

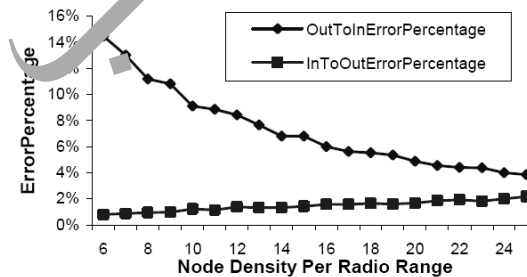
¹ Approximate Point In Triangle

برای انجام الگوریتم APIT در شبکه های سنسور بدون نیاز به اینکه گره ها جابجا شوند از تراکم گره های موجود استفاده می شود. برای این منظور هر گره پس از تبادل اطلاعات با همسایه هایش متوجه خواهد شد که آیا درون مثلث است و یا خارج آن، اگر هیچ یک از همسایه های M به تمام رأس های مثلث ΔABC نسبت به خود M نزدیکتر و یا از آن ها دورتر نباشد آنگاه نقطه M درون مثلث ΔABC خواهد بود و در غیر این صورت خارج از آن قرار دارد. از آنجا که APIT تنها تعداد محدودی از جهت ها را (به خاطر تعداد محدود همسایه ها) بررسی کند لذا اشکالاتی نیز ممکن است بروز کند، ۲ نمونه از این خطاها را در شکل ۷ مشاهده می کنیم.



شکل ۷- نمونه های بروز خطا در روش APIT

در شکل ۷ قسمت A مشاهده می شود که گره M با توجه به اینکه گره ۳ از هر ۳ رأس مثلث نسبت به M دور تر است، بطور اشتباه نتیجه می گیرد که خارج از مثلث است. به این خطا InToOut گفته می شود. در قسمت B همان شکل گره M با توجه به اینکه هیچ یک از گره های همسایه از تمام رأس های مثلث نسبت به خود M دور تر و یا نزدیکتر نیستند، به اشتباه نتیجه گیری می کند که درون مثلث قرار دارد. به این خطا OutToIn گفته می شود. البته لازم به ذکر است که در بررسی های انجام شده در [۱۴] نشان داده شده است که در بدترین شرایط این خطا از ۱۴٪ تجاوز نمی کند. (شکل ۸). همانطور که در شکل نیز مشخص گردیده است با افزایش چگالی گره ها، APIT می تواند جهت های بیشتری را تخمین بزند و از اینرو خطای OutToIn را کاهش دهد از طرفی خطای InToOut با توجه به نمونه های اول می تواند افزایش یابد.



شکل ۸- درصد خطا در قبال تغییر چگالی گره ها در APIT

پس از اجرای الگوریتم APIT نتایج جمع آوری شده (نتایج صحیح به همراه تعدادی نتیجه غلط) به الگوریتم دیگری به نام SCAN اعمال می گردد. بطور خلاصه برای این منظور یک صفحه شطرنجی برای نمایش حداکثر محیطی که یک گره می تواند در آن قرار بگیرد در نظر گرفته می شود. در مقاله این مقدار برابر 0.1R در نظر گرفته شده است. به ازای هر مثلثی که گره مذکور درون آن قرار دارد به مقدار آن ناحیه که در آن مثلث قرار گرفته یکی اضافه می گردد. برای ناحیه مثلث هایی که گره مذکور در آن قرار نگرفته است مقدار ۱- در نظر گرفته می شود. سپس ناحیه ای که بیشترین مقدار را دارد در نظر گرفته می شود و مرکز ثقل آن ناحیه بعنوان تخمینی از موقعیت گره در نظر گرفته می شود. (شکل ۹)

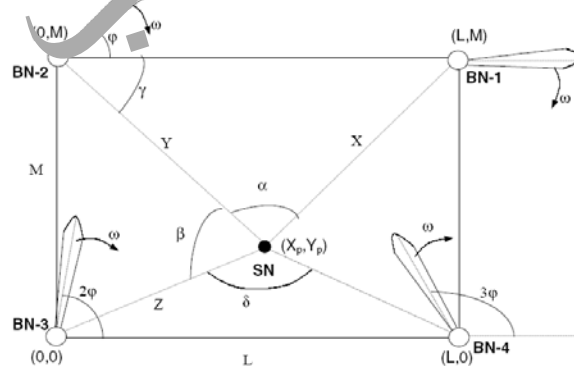
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	2	2	1	1	0	-1	0	0
1	1	2	2	1	1	0	-1	-1	0
0	0	2	2	2	1	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	0	0	-1	-1	-1

شکل ۹- الگوریتم SCAN

استفاده از اطلاعات AoA ^۱

یکی از روشهایی که برای تخمین موقعیت از زاویه استفاده کرده است، مقاله [۱۵] می باشد. در این مقاله تکنیک مکان‌یابی بر اساس تعدادی مرجع ثابت است که می توانند کل شبکه را با استفاده از آنتنهای جهت دار پوشش دهند. این شبکه از تعداد زیادی گره های سنسور که در مکانهای تصادفی ولی ثابتی نسبت به یکدیگر قرار دارند، تعدادی گره مرجع با آنتن جهت دار برای پوشش کل شبکه و یک مرکز پردازش و کنترل تشکیل شده است. گره ها مرتب در حال شوند برای دریافت سیگنال از طرف محیط هستند و پس از بررسی و پردازش اطلاعات دریافتی، آن را به مرکز کنترل ارسال می کنند. این کار را می تواند با استفاده از روشهای چند گامی^۲ انجام دهد. حداقل سه مرجع لازم است تا بتوان از این روش استفاده کرد در ضمن مکان این مرجع ها نیز مهم نیست. سیگنال ارسال شده توسط مرجع یک سیگنال رادیویی با بیم نازک که با سرعت زاویه ای $\omega \frac{deg}{s}$ می چرخد است. این چرخش را می توان یک آنتن جهتدار نصب شده که به صورت مکانیکی مانند یک رادار می چرخد و یا با استفاده از آنتنهای هوشمند که بصورت الکترونیکی بیم آنها هدایت می شود [۱۶] انجام داد. در این صورت هر گره هر یک از بیم های فوق را هر $\frac{360}{\omega}$ ثانیه یک بار دریافت می کند.

سیگنال های ارسال شده از مرجع های مختلف می بایستی قابل تشخیص باشد این کار را می توان با در نظر گرفتن کاربری مجزا برای هر مرجع و یا استفاده از کدهای مجزا انجام داد. همچنین اختلاف زاویه ثابت φ بین هر کدام از بیم های چهار مرجع BN-1، BN-2، BN-3، BN-4 و وجود دارد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمای کلی از یک نحوه محاسبه از طریق AoA

اساس مکان‌یابی بر پایه زمان دریافت هر یک از سیگنالها از طرف هر یک از مرجع ها است. اگر زمان دریافت سیگنال از هر یک از مرجع های BN-1، BN-2، BN-3، BN-4 را به ترتیب t_1, t_2, t_3, t_4 بنامیم روابط زیر برقرار خواهد بود.

¹ Angel of Arrival

² Multi-Hop

$$\alpha = \varphi - \omega\tau_1$$

$$\beta = \varphi - \omega\tau_1$$

$$\delta = \varphi - \omega\tau_1$$

که در آن $\tau_1 = t_2 - t_1$ ، $\tau_2 = t_3 - t_2$ و $\tau_3 = t_4 - t_3$ ، ۲ انتخاب از ۳ انتخاب زاویه های α, β, δ را برای محاسبه انتخاب می کنیم ، مثلاً برای زوایای α, β خواهیم داشت :

$$\gamma = \arctan \left[\frac{\cos(\beta) - S \sin(\alpha)}{S \cos(\alpha) - \sin(\beta)} \right], Y = L \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin \alpha}$$

$$S = \frac{L \sin(\beta)}{M \sin(\alpha)}, (X_p, Y_p) = (Y \cos(\gamma), M - Y \sin(\gamma))$$

البته اشکالاتی نیز در عمل نیز می تواند بروز کند که عامل تولید خطا باشد. یکی صفر نبودن پهنای بیم و دیگری تولید سیگنالهای متعدد با توجه به برخورد سیگنال اصلی به موانع است. گیرنده مشکل اول را می تواند با تخمین زمان نمونه برداری به زمانی که سیگنال به حداکثر خود می رسد حل کند، همچنین مشکل دوم را نیز با در نظر گرفتن یک سطح آستانه مناسب برای توان سیگنال دریافتی می تواند بر طرف کند. (توضیحات بیشتر در [۱۵]). البته نتایج شبیه سازی نشان داده است که در صورتی که پهنای بیم به ۱۵ درجه برسد ، خطا بسیار کم خواهد شد. از مزایای مهم این روش یکی آن است که کارایی الگوریتم به چگالی گره ها بستگی ندارد و دیگری آنکه چون الگوریتم بر اساس تخمین زوایا عمل می کند به مقدار مطلق فاصله بستگی ندارد.

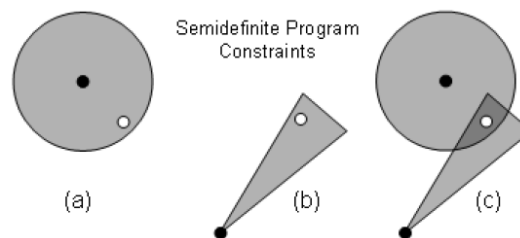
۵- مکان یابی در محیط های Multi-Hop

تاکنون تمام روشهای بررسی شده بر این اساس بوده است که هر گره می توانسته است با تعدادی مرجع در ارتباط باشد. از آنجا که در شبکه های بی سیم سنسور، تمامی گره ها نمی توانند با حد اقل ۳ مرجع در ارتباط باشند این فرض همواره درست نخواهد بود لذا روشهایی نیاز است تا بتواند این مشکل را بر طرف کند که به تعدادی از آنها در این قسمت اشاره می شود.

۵-۱- ارتباط در شبکه های چند گامی

SDP^۱ feasibility formulation

اولین راه حل برای موقعیت یابی در شبکه های چند گامی ، براساس اطلاعات در مورد ارتباط^۲ بین گره های شبکه است و به تعیین موقعیت به دید یک feasibility problem نگاه می کند. SDP ابتدا توسط Dohetry و دیگران در [۱۷] معرفی گردید. در این الگوریتم شرایط هندسی بین گره ها با یک LMI^۳ توصیف می شود. هنگامی که تمامی شرایط شبکه به این صورت درآمدند ترکیب این LMIها می تواند یک SDP بزرگتر را تشکیل دهد (شکل ۱۱) که این SDP به صورت مرکزی تحلیل می شود.



¹ Semidefinite Program

² Connectivity

³ Linear Matrix Inequality

شکل ۱۱- a) شرط شعاعی مثلاً برای ارتباط رادیویی (b) شرط مثلثی برای داده های دریافتی از طریق c) تخمین موقعیت با استفاده از تلاقی دو شرط convex

البته این نکته را بایستی در نظر داشت که تمامی شرایط هندسی را نمی توان توسط LMI ها توصیف کرد، تنها شرایطی که فرم محدب داشته باشند می توان با LMI توصیف کرد. مثلاً در مدل متقارن دایروی ارتباط بین مکان گره ها توسط یک شرط 2-norm انجام می پذیرد، برای حداکثر محدوده ارتباط R و مکان گره های a و b، LMI معادل برابر خواهد بود با:

$$\|a-b\|_2 \leq R \Rightarrow \begin{bmatrix} I_2 R & a-b \\ (a-b)^T & R \end{bmatrix} \geq 0$$

که در آن I_2 مشخصه ۲ بعدی است. نویسندگان مقاله همچنین در مورد گونه های دیگر این ایده اولیه بحث هایی نموده اند، که می توان به استفاده از تخمین واقعی فاصله بجای استفاده از یک حد بالایی برای فاصله، استفاده از اطلاعات بدست آمده زاویه ای به جای فاصله ای و محدود کردن حجم محاسبات خطای موقعیت با حل چند feasibility problem اشاره کرد. با توجه به این که محاسبات می بایستی به صورت مرکزی انجام شود لذا این روش کاربردهای محدودی در شبکه های سنسور دارد.

MDS¹

این روش که توسط Shang و دیگران [۱۸] معرفی شد، مانند روش قبل به صورت پردازش مرکزی عمل می کند. در این روش به جای استفاده از SDP از MDS-MAP استفاده می شود. ایده اصلی این روش بدین صورت است: فرض کنید n نقطه در یک حجم وجود دارد که جری نقاط مشخص نیست ولی فاصله بین هر جفت از این نقاط مشخص است و هدف محاسبه مکان تقریبی نقاط است.

این روش با استفاده از قوانین مثلثاتی و جبر خطی مختصات نسبی نقاط را بر اساس فاصله دو به دوی آنها محاسبه می کند. در ضمیمه الف جزئیات ریاضی این روش درج شده است. این الگوریتم دارای چهار گام اصلی است.

گام ۱) اطلاعات فاصله را از شبکه جمع آوری کن و ماتریس R با ابعاد $n \times n$ بساز. در آن r_{ij} برابر فاصله بین گره i ام و گره j ام یا صفر اگر فاصله ای یافته نشد، است.

گام ۲) یک الگوریتم shortest path استاندارد مانند Dijkstra یا Floyd را روی هر زوج گره ماتریس R اعمال کن و مقدار فاصله حاصل را در ماتریس D بریز.

گام ۳) برای تخمین موقعیت گره x، بر روی ماتریس D الگوریتم MDS را اعمال کن. (ر.ک. ضمیمه الف).

گام ۴) پاسخ حاصل را بوسیله تعداد مرجع های ثابت وبا استفاده از زیر روال CSR² موجود در ضمیمه ب به مختصات مطلق تبدیل کن.

همانطور که مشخص است الگوریتم MDS بر اساس مرجع ها عمل نمی کند (تنها در گام چهارم برای تبدیل مختصات نسبی به مطلق از آنها استفاده می کند) و از این بابت نسبت به وضعیت قرار گرفتن مرجع ها پایدار است. حتی اگر تعداد کمی از آنها نیز در سطح شبکه وجود داشته باشند باز هم می توان به نتایج خوبی دست یافت. برای نمونه در [۱۹] برای شبکه های anisotropic نشان داده شده است که MDS در این حالت نیز بخوبی عمل می کند.

¹ Multidimensional Scaling

² Coordinate System Registration

۵-۲- تخمین فاصله چندگامی

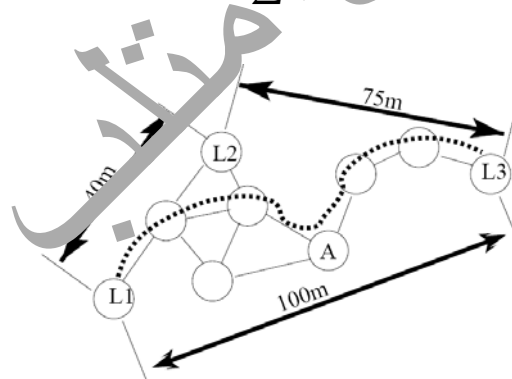
در روش Multilateration برای مشخص شدن مختصات یک گره نیاز است تا فاصله با ۳ مرجع برای آن گره مشخص باشد. حال فرض کنید که مرجع‌ها نتوانند برای تمامی گره‌ها امکان تخمین فاصله را عملی کنند (مثلاً با توجه به محدود بودن توان رادیویی مرجع) در این حالت تنها گره‌های نزدیک (همسایه) مرجع‌ها می‌توانند این فاصله را تخمین بزنند. [۲۰] روشی را برای حل این مشکل ارائه کرده است. ایده اصلی این روش استفاده از تخمین فاصله بطور غیر مستقیم از طریق چندگامی برای استفاده در روش Multilateration است. در مقاله، ۳ روش برای پیاده سازی این ایده معرفی شده است که در زیر به بررسی آنها می‌پردازیم.

DV-Hop

این روش ساده ترین حالت ممکن است، در این روش ابتدا با استفاده از الگوریتم DV^1 ، تمامی گره‌ها در شبکه فاصله خود را تا هریک از مرجع‌ها بر اساس تعداد گام محاسبه می‌کنند. هنگامی که یک مرجع فاصله خود را با دیگر مرجع‌ها دریافت کرد. برای یک گام خود فاصله متوسطی را محاسبه می‌کند و آن را به تمام شبکه ارسال می‌کند. هر بار این کار را با دریافت اطلاعات تازه مجدداً بعنوان نصیح مقدار قبل در شبکه از طریق Controlled flooding ارسال می‌کند. پس از آنکه گره‌ای با مختصات نامشخص فاصله خود را بر حسب گام تا هر مرجع و همچنین متوسط فاصله هرگام که از طریق مرجع اعلام شده را دریافت کرد. مختصات خود را با استفاده از روش Multilateration محاسبه می‌کند. هر گره i با مختصات (x_i, y_i) برای محاسبه متوسط فاصله خود c_i از فرمول زیر استفاده می‌کند.

$$c_i = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_i}$$

مثلاً شکل ۱۲ را در نظر بگیرید.



شکل ۱۲- نمونه ای از روش DV-Hop

فرض کنید گره‌های $L1, L2, L3$ مرجع باشند و گره $L1$ فاصله اقلیدسی خود را تا گره‌های $L2$ و $L3$ و همچنین طول کوتاهترین مسیر بین خودش بر حسب گام را برای دو گره فوق به ترتیب ۲ و ۶ محاسبه کرده باشد. لذا $L1$ مقدار متوسط فاصله هرگام را برابر $\frac{100+40}{6+2} = 17.5$ تخمین می‌زند. به همین ترتیب $L2$ و $L3$ نیز فاصله خود را برابر $\frac{40+75}{2+5} = 16.42$ و $\frac{75+100}{6+5} = 15.90$ محاسبه می‌کنند و این نتایج را در شبکه اعلام می‌کنند. حال گره A این فواصل را دریافت کرده و برای فاصله تخمینی خود تا گره‌های مرجع، فاصله بر حسب گام کوتاهترین مسیر تا آن مرجع را ضرب در متوسط فاصله آن مرجع می‌کند و سپس از روش Multilateration موقعیت خود را محاسبه می‌کند.

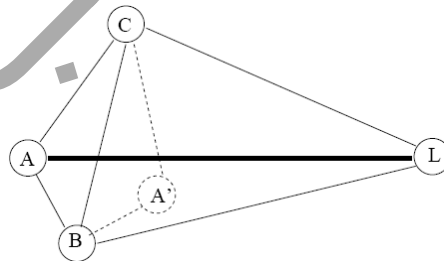
¹ Distance Vector

DV-Distance

این روش نیز مانند روش قبل است با این تفاوت که فاصله اندازه گیری شده بین گره ها به جای آنکه بر حسب گام باشد بر حسب توان سیگنال دریافت شده تخمین زده می شود و در این حالت الگوریتم DV بر اساس مجموع فواصل تخمین زده شده عمل می کند. مزیت این روش نسبت به روش قبل آن است که گام ها ممکن است فاصله های متفاوتی را داشته باشند و لذا از این نظر این روش بهتر عمل می کند حال آنکه بحث های ذکر شده بر اساس تخمین فاصله از طریق توان در اینجا نیز صدق می کند.

فاصله اقلیدسی

در این روش گره ها فاصله اقلیدسی واقعی تا هر مرجع را محاسبه می کنند. شکل ۱۳ را در نظر بگیرید. در این روش، گره دلخواه A برای اینکه فاصله اقلیدسی خودش را تا گره L محاسبه کند بایستی دارای دو همسایه مثلاً B و C باشد که آنها فاصله تخمینی خود تا L را می دانند. همچنین A تخمینی از فواصل AB، AC و BC را در اختیار دارد. در اینجا این شرط نیز باید برقرار باشد که یا B و C در عین اینکه همسایه A هستند همسایه یکدیگر نیز هستند و یا اینکه A فاصله BC را می داند. چهار ضلع چهار ضلعی ABCL همگی مشخص هستند، همچنین یکی از قطرهای این چهار ضلعی نیز مشخص است. از اینرو می توان فاصله رأس A تا L که در واقع فاصله اقلیدسی A¹ نیز هست را محاسبه کرد. این امکان وجود دارد که نسبت BC در طرفی که L قرار دارد، قرار داشته باشد که در شکل با A' نشان داده شده است. این که کدامیک از دو حالت فوق برقرار است توسط خود A انجام می پذیرد. این کار را یا با رأی گیری^۱ از سایر همسایه اش که تخمینی تا L دارند و یا از طریق بررسی ارتباط با سایر همسایه های مشترک B و C انجام می دهد. در صورتی که راه حلی نتواند پیدا کند تا زمانی که همسایه های بیشتری که تخمینی تا L دارند و بتوانند در رأی گیری شرکت کنند و یا همسایه های با دو گام فاصله که تخمینی تا L دارند به حد نصاب برسند به تعویق می اندازد. پس از محاسبه مکان مناسب A با استفاده از قضیه کلی فیثاغورث طول AL را محاسبه می کند.



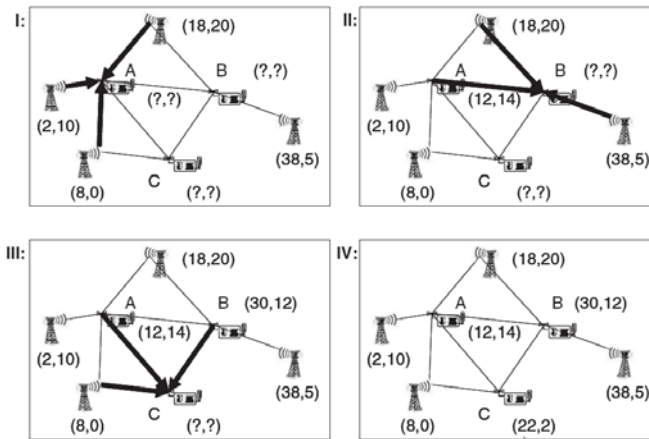
شکل ۱۳ - استفاده از فاصله اقلیدسی

روشهای یاد شده هر یک به نوبه خود معایب و مزایایی دارند، الگوریتم هایی که بر اساس DV هستند از پیچیدگی کمی برخوردار بوده و برای حالتی که تعداد مرجع ها نسبتاً پایین است خوب عمل می کند. روش اقلیدسی برای توپولوژی های nonisotropic از دقت بالاتری نسبت به روشهای DV برخوردار است. همچنین دقت این روش با افزایش تعداد مرجع ها افزایش می یابد. در شبیه سازی ها نشان داده شده که فاصله تخمینی بطور متوسط کمتر از یک گام رادیویی از فاصله واقعی کمتر است.

Iterative and Collaborative Multilateration

¹ Voting

در روش قبل هر گره پس از محاسبه فاصله خودش تا مرجع ها با استفاده از روش Multilateration موقعیت خود را محاسبه می کرد. در روشی که در این قسمت معرفی می کنیم، هر گره پس از تخمین موقعیت خود، می تواند در مراحل بعدی بعنوان یک مرجع در الگوریتم Multilateration شرکت کند. (شکل ۱۴)



شکل ۱۴- روش iterative

در این شکل گره های A، B و C، مختصات خود را نمی دانند، گره A بوسیله Trilateration مختصات خود را محاسبه می کند، در این حالت B نیز با استفاده از ۲ مرجع دیگر مختصات خود را محاسبه می کند. این روش ابتدا توسط Savides و دیگران تحت عنوان AHLoS [۲] مطرح شد و در آن مقاله روش برای محاسبه موقعیت از Atomic Multilateration استفاده شد که در این روش سرعت انتشار سیگنال به صورت دینامیکی تخمین زده می شود و در ۳-۲ نیز به آن اشاره گردید. همچنین برای محاسبه فاصله نیز از روش TDOA استفاده می کند.

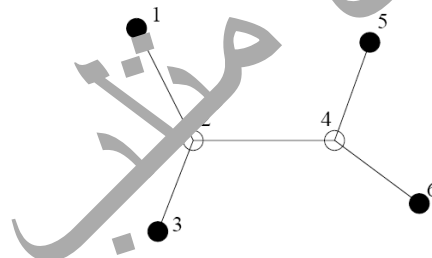
Iterative Multilateration

دو حالت برای پیاده سازی الگوریتم توصیف شده در بالا وجود دارد یکی بصورت مرکزی و دیگری به صورت توزیع شده، در حالت پیاده سازی به صورت مرکزی در هر تکرار، از گره های که به بیشترین تعداد مرجع (یا گره هایی که مختصات خودشان را محاسبه کردند) دسترسی دارد الگوریتم را شروع می کنیم البته پیاده سازی به صورت مرکزی مشکلاتی نیز در بر خواهد داشت. مثلاً Robustness و همچنین طول عمر باتری گره های نزدیک مرکز که به مراتب کوتاهتر از بقیه خواهد بود و در صورت خاموش شدن کل سیستم از کار خواهد افتاد. در حالت توزیع شده نیز، گره ها به صورت منفرد به محض مشاهده ۳ گره که از طریق آنها بتوانند trilateration را انجام دهند، موقعیت خود را تخمین می زنند و این تخمین می تواند در تکرارهای بعدی بهبود پیدا کند. در روش توزیع شده می بایستی امیدوار بود که در نهایت الگوریتم همگرا شود، همچنین می توان برای تخمین اولیه گره ها از موقعیت خودشان از روشهایی مانند DV-hop و یا DV-distance نیز استفاده کرد. ضعف الگوریتم iterative Multilateration در انتشار خطا خواهد بود زیرا گره هایی که مختصات خود را با خطا تخمین زده اند در محاسبات بعدی نیز از آنها استفاده می شود و همین امر موجب می شود الگوریتم هیچگاه همگرا نشود، البته نویسنده [۲] ادعا کرده است که این خطا به خاطر تخمین دقیقی که الگوریتم انجام می دهد خیلی زیاد نخواهد بود و برای یک محیط مربعی با ابعاد ۱۵×۱۵ متر و در نظر گرفتن خطای اندازه گیری فاصله و خطای قرارگیری مرجع ها، نتایج شبیه سازی نشان می دهد که خطای تخمین در حدود ۲۰cm با محل واقعی تفاوت دارد. البته Savarese در مقاله ای مشابه متوسط خطای موقعیت را وابسته به دقت در اندازه گیری فاصله، تخمین ابتدایی از موقعیت، متوسط تعداد همسایه های هر گره و تعداد مرجع ها می داند همچنین در آن مقاله به اشاره به اینکه دو علت عمده در همگرا نشدن الگوریتم یکی انتشار خطا و دیگری توپولوژی

شبکه است، ضمن بررسی موارد فوق به بیان راه کارهایی نیز می پردازد. مثلاً برای کاهش خطای انتشار و اطمینان از صحت مختصات تخمین زده شده از وزن هایی برای هر معادله در دستگاه معادلات خطی استفاده می کند. در این حالت به جای حل ماتریس $Ax = b$ ، ماتریس $wAx = wb$ را حل می کنیم که در آن w وزن اطمینان هر معادله است. مثلاً گره هایی مانند مرجع ها که تخمین دقیقی از مختصات خود دارند از وزن اطمینان بیشتری (قریب به یک) برخوردار هستند ولی گره هایی که از شرایط مطلوبی برخوردار نیستند (همسایه های کمی دارند و یا جای مناسبی ندارند) از وزن اطمینان کمتری (قریب به صفر) برخوردار می شوند که در این حالت تأثیر کمتری در سایر محاسبات خواهند داشت که البته Savvides نیز به آن اشاره کرده بود. با استفاده از این تکنیک تقریباً تمام حالت های بررسی شده در مقاله همگرا شدند و همچنین دقت تخمین موقعیت نیز بطرز قابل توجهی افزایش یافت. قبل از بررسی مشکل دوم و یا توپولوژی به معرفی الگوریتم دیگری در زیر می پردازیم.

Collaborative Multilateration

در شبکه های Ad-hoc با توجه به توزیع تصادفی مرجع ها این امکان وجود دارد که در برخی از گره ها امکان استفاده از Multilateration وجود نداشته باشد مثلاً حالتی که یک گره با مختصات نامشخص هیچگاه از ۳ همسایه با مختصات مشخص برخوردار نباشد. در این صورت Savvides روشی را برای تخمین موقعیت در برخی از این حالت ها بر اساس اطلاعات از همسایگان با فاصله چنان نام از گره مورد نظر با نام Collaborative Multilateration معرفی کرده است. در شکل ۱۵ ساده ترین حالت ممکن برای استفاده از این روش نشان داده شده است. گره های ۲ و ۴ گره هایی با مختصات نامشخص هستند و گره های ۱، ۳، ۵ و ۶ مختصات مشخصی دارند. از آنجایی که هر یک از گره های دو و چهار هر یک ۳ همسایه دارند و سایر گره های دیگر نیز مرجع هستند یک پاسخ یکتا برای دو و چهار می توان محاسبه کرد.



شکل ۱۵- استفاده از Collaboration Multilateration

روش کار بدین صورت است که در گراف $G = (N, E)$ ، شامل $|N| = n$ گره و مجموعه E با تعداد $n-1$ یال و یا بیشتر، مرجع ها با مجموعه B و مجموعه گره های با مختصات نامشخص به صورت مجموعه U که در آن $B \subseteq N, U \subseteq G$ مشخص می شوند. هدف می نیم کردن عبارت زیر به ازای هر زوج (x_u, y_u) عضو مجموعه U و برای هر زوج گره شرکت کننده i, u^1 که در آن $(i \subseteq B \vee i \subseteq U) \wedge u \subseteq U$ خواهد بود.

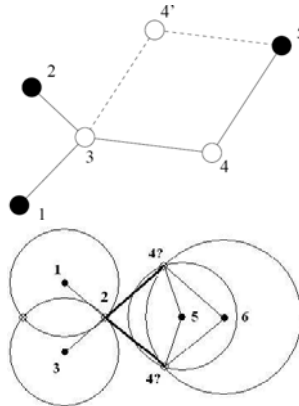
$$f(x_u, y_u) = D_{iu} - \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2} *$$

تعریف (۱) یک گره را شرکت کننده گویند اگر یک مرجع باشد و یا یک گره با مکان نامشخص با حداقل ۳ همسایه شرکت کننده باشد.

تعریف (۲) یک جفت، شرکت کننده، یک ارتباط بین زوج گره مرجع-نامشخص و یا نامشخص-نامشخص است که در آن تمامی نامشخص ها، شرکت کننده هستند.

¹ Participating

مثلاً در همان شکل ۱۵ اگر Collaborative Multilateration از گره ۲ شروع شود، گره ۲ می بایستی حداقل ۳ همسایه شرکت کننده داشته باشد. گره های ۳ و ۴ مرجع هستند لذا طبق تعریف شرکت کننده هستند. گره ۴ نامشخص است ولی ۲ همسایه مرجع دارد که ۵ و ۶ هستند. گره ۴ همچنین به گره ۲ متصل است و لذا هر دوی آنها طبق تعریف اول شرکت کننده هستند. برای شروع الگوریتم، گره های شرکت کننده در Collaborative Multilateration یک زیر گراف G را تشکیل می دهند که در آن بازای هر لینک عضو E که یک زوج شرکت کننده را طبق تعریف دوم به هم مرتبط می کند، معادله به فرم $*$ را می توان نوشت. برای اطمینان از یکتا بودن پاسخ لازم است تمامی گره های در نظر گرفته شده شرکت کننده باشند. در شکل ۱۵، ۵ یال داریم و لذا پنج دسته معادله می توان نوشت، البته در بعضی از موارد دستگاه معین n معادله n مجهول (شکل ۱۶) ممکن است بدست آید که در این حالت مثلاً برای گره X ، دو جواب را می توان بدست آورد و از اینرو جواب منحصر به فرد نخواهد بود و گره X شرکت کننده نیست. اگر شرایط گفته شده در بالا فراهم شود (بتوان پاسخ منحصر بفردی بدست آورد) معادلات خطی یاد شده بوسیله روشهای optimization مانند gradient descent و شبیه سازی قابل حل خواهند بود. روش Collaborative Multilateration می تواند در کنار روش Iterative Multilateration در شرایطی که چگالی مرجع ها پایین است و شرایط استفاده از Atomic Multilateration امکان پذیر نیست، استفاده شود. Savarese در [۲۱] از روش متفاوتی برای حل مسئله استفاده کرده است. ایشان دو مانع اصلی موجود بر سر راه مکان یابی دقیق در شبکه های Ad-hoc را مرجع های پراکنده و خطای تخمین فاصله معرفی کردند و برای حل جداگانه این مسائل، الگوریتمی با دو فاز مجزای شروع و بهبود^۱ را بیان نمودند. برای فاز شروع از روش Hop-Terrain معرفی شده در مقاله که روشی مشابه DV-Hop معرفی شده در ۵-۲ است، استفاده می شود. Hop-Terrain یکبار در شروع هر الگوریتم موقعیت یابی، برای غلبه بر مشکل پراکندگی مرجع ها اجرا می شود و الگوریتم Refinement به صورت iterative برای بهبود تخمین فاصله حاصل از Hop-Terrain بعد از فاز شروع اجرا می شود. فاز بهبود روش فوق، تنها فاصله همسایه های با فاصله یک گام را در هر گره در نظر می گیرد و همین امر scalablility الگوریتم را تضمین می دهد. در شرح گام یک گره مختصات تخمینی خود را broadcast می کند و همچنین مختصات تخمینی همسایگان خود را دریافت و به صورت MMS، Multilateration را برای مختصات جدیدتر انجام می دهد. که البته برای همگرایی الگوریتم فوق مسامحه نادر شده در Iterative Multilateration موثر هستند. حال بر می گردیم به مسأله دیگر عدم همگرایی و آن اشکال در توپولوژی شبکه است. برخی از توپولوژی ها ذاتاً برای تخمین موقعیت بسیار مشکل و یا نشدنی هستند. برای نمونه دسته ای از گره ها (بدون مرجع) را در شبکه در نظر بگیرید که با یک لینک واحد به مابقی شبکه مرتبط شده اند و یا شکل ۱۶ بعنوان نمونه های دیگری که در قبل بدان اشاره شد.



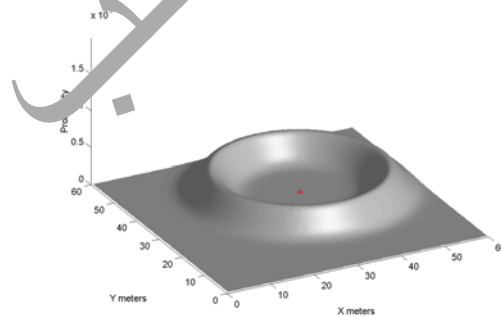
شکل ۱۶- حالات نامناسب برای Collaborative Multilateration

¹ Startup and Refinement

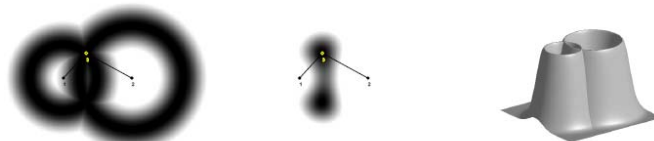
برای حل مشکلات توپولوژی بیان شده، می بایستی در الگوریتم تغییراتی را اعمال کنیم. تشخیص اینکه یک گره به صورت ill-connected است، آسان است. در حالت دو بعدی اگر تعداد همسایگان کمتر از دو بود یک گره ill-connected است. ولی روشی برای تشخیص گروهی گره های ill connected دشوار است. در الگوریتم ارائه شده توسط Savarese روشی ابتکاری^۱ برای تشخیص گره های ill-connected بدین صورت معرفی گردیده است: گره ای را Sound گوئیم اگر حداقل سه مرجع مستقل از هم داشته باشد. مستقل از این بابت که در مسیر های چند گامی به مرجع ها لینک مشترکی نداشته باشند. برای مثال در شکل ۱۶- بالا گره سه این شرط را ارضا می کند و لذا یک گره Sound است. برای تعیین اینکه یک گره Sound است. الگوریتم Hop-Terrain ID، گره همسایه ای را که از طریق Shortest Path به مرجع می رسد را ذخیره می کند. هنگامی که تعداد ID ها مجزا به سه رسید، گره خودش را Sound معرفی می کند. همسایگان گره Sound نیز ID آن را به مجموعه خود اضافه می کنند و اگر مجموعه Sound آنها نیز به حد نصاب رسید خود را نیز به صورت Sound معرفی می کنند. در نهایت بسیاری از گره های ill-connected قادر به رسیدن حد نصاب مجموعه همسایگان Sound خود نیستند و لذا در فاز Refinement شرکت نمی کنند. برای مثال در شکل ۱۶- بالا گره سه Sound می شود ولی گره ۴ این امکان را پیدا نخواهد کرد. در صورتی که در الگوریتم AHLoS مقاله Savvides هر دوی آنها ill-connected معرفی می شدند. این الگوریتم نیز مانند الگوریتم AHLoS ای حالتی که تراکم مرجع ها کم است نیز بخوبی عمل می کند. البته راهبردهای کلی برای افزایش دقت روش های فوقی در توان در High Connectivity شبکه (بطور متوسط برای هر گره ۱۰ همسایه بتوان در نظر گرفت)، و وجود حداقل ۵٪ مرجع و آنهم در شبکه های شبکه دانست.

توصیف احتمالی موقعیت و انتشار

همانطور که در شکل ۲ نیز نشان داده شد، یک گره با توجه به مقدار RSSI دریافتی به این نتیجه می رسد که می بایستی با احتمال بالایی جایی بر روی یک دایره ای حول مربع قرار گرفته باشد. (شکل ۱۷) و این در حالی است که با در نظر گرفتن چگالی احتمال مرجع دوم، چگالی احتمال اول در چگالی احتمال سوم کانوال شده و تخمین بهتری از موقعیت گره ها ارائه می کند. (شکل ۱۸)



شکل ۱۷- تابع چگالی احتمال موقعیت گره بعد از محاسبه تخمین فاصله تا یک مرجع



شکل ۱۸- از چپ به راست: ۱- منحنی کانتور حاصل از مرجع های ۱ و ۲، ۲- نتیجه تخمین حاصل، ۳- نمایش منحنی اول در محیط ۳ بعدی در [۲۱] جزئیات ریاضی بیشتر این بحث بیان شده و در انتها به این نتیجه رسیده است که خطای اندازه گیری فاصله بین گره های متفاوت، متغیر است.

¹ heuristic

۶- تاثیر قرار گرفتن مرجع ها

همانطور که در قبل نیز بدان اشاره شد، در بسیاری از نتایج شبیه سازی ها من جمله [۱۷] و [۵] نشان داده شده است که مکان مناسب برای قرار دادن مرجع ها، محیط پیرامون شبکه است. همچنین بیان شد که با افزایش تعداد مرجع ها دقت محاسباتی افزایش خواهد یافت. معمولاً با توجه به کاربردهای شبکه های سنسور نمی توان برای مکان مرجع ها در شبکه از قبل طرح ریزی کرد و می بایستی بدنال راهکارهای دینامیک بود. یک راه حل ساده ارائه شده در [۲۱] استفاده از یک موجودیت متحرک برای اندازه گیری خطای تخمین موقعیت نسبت به یک منبع خارجی مثلاً GPS است. البته اشکال این روش نیاز به اندازه گیری مطلق خطای موقعیت یابی است. Bulusu در [۱۳] الگوریتم وقتی دیگری را بدون نیاز به موجودیت متحرکی و تنها براساس خطای تخمین موقعیت به صورت محلی، معرفی کرده است. در این روش مرجع های موجود اطلاعاتی را در مورد یکدیگر جمع آوری می کنند سپس یک مرجع خطای تخمین موقعیت را برای یک گره فرضی محاسبه می کند. این کار را با استفاده از سایر مرجع ها و امکان دسترسی به آنها انجام می دهد. با توجه به اینکه این روش نسبت به روش قبل از دقت کمتری برخوردار است ولی از طرفی بار تحمیلی شبکه را کاهش می دهد. روشهای یاد شده بیشتر در شبکه های با چگالی کم است، در حالی که در شبکه های با چگالی بیشتر از مکانیزم روشن/خاموش کردن مرجع ها برای صرفه جویی در مصرف انرژی و در عین حال بر خورداری از دقت کافی برای موقعیت گره ها استفاده می شود.

۷- GPS^۱

GPS شامل ۲۷ ماهواره MEO^۲ که در حالت عالی ۲۴ عدد از آنها فعال بوده و ۳ عدد دیگر در صورت خرابی یکی جایگزین خواهد شد. اساس کار گیرنده GPS، اندازه گیری فاصله از حداقل ۴ عدد از ماهواره های فوق است. البته می توان با تخمین فاصله از ۳ ماهواره و حذف نقطه فضا، نیز به نتیجه رسید. راه حل استفاده شده برای تخمین موقعیت استفاده از Multilateration است. ولی به صورت عملی، ماهواره چهارم برای تنظیم clock offset گیرنده الزامی است. ماهواره از طریق دو کاریر L1 و L2 سیگنالهای خود را ارسال می کند

ماهواره های GPS سه نوع مختلف از سیگنال را ارسال می کنند، نوع اول Almanac است که اطلاعات کلی در مورد زمان و وضعیت ماهواره را دربر دارد، نوع دوم ephemeris نام دارد که حاوی اطلاعات مربوط به مداری که ماهواره در آن قرار دارد است، این اطلاعات که به صورت ۳۷۵۰۰ بیت بنام Navigation Message با ریت ۵۰ Kbps طی ۱۲ دقیقه ارسال می گردند، سایر اطلاعات موجود در این پیام مختصات GPS به صورت تابعی از زمان، وضعیت سالم بودن ماهواره، Clock Correction ماهواره و اطلاعات جوی است. هر ماهواره Navigation message مخصوص به خود را همراه با اطلاعات جانبی در مورد ماهواره های دیگر مثل محل و سالم یا معیوب بودن آنها ارسال می کند.

همچنین ماهواره دو مدل اطلاعات را در مورد زمان (clock) برای همه گیرنده ها Broadcast می کند، یکی Coarse/Acquisition یا C/A که برای عموم ارسال می شود و دیگری کد دقیق یا P-Code که برای کارهای نظامی در نظر گرفته شده است. کد C/A بطول ۱۰۲۳ یک PRN که در با ریت ۱/۰۲۳ Mcps ارسال می شود و در هر یک میلی ثانیه این کار انجام می شود. هر ماهواره کد C/A مخصوص بخودش را دارد که منحصر بفرد است. کد P نیز یک PRN است که با ریت ۱۰/۲۳ Mbps ارسال می گردد که کل کد حاصل ۲۶۶ روز طول می کشد تا مجدداً تکرار شود ولی این ۲۶۶ روز به ۳۸ قطعه تقسیم شده اند که ۳۲ قسمت از این کدها بصورت یکتا به هر یک از ماهواره ها اختصاص داده شده است. هر کدام

¹ Global Positioning System

² Medium Earth Orbit

از این قطعات برای دریافت کامل یک هفته بطول می انجامد. کد P ابتدا به کد Y رمز می شود، که تنها توسط کسانی که از کلید با خبر هستند رمز گشایی می گردد. کد C/A بر روی L1 و کد P بر روی L1 و L2 ارسال می شود.

برای محاسبه مختصات، گیرنده GPS لازم است زمان دقیق را بداند. ماهواره های GPS بر اساس ساعت های اتمی کار می کنند و گیرنده های GPS بر اساس اسیلاتور کریستالی داخلی خودشان که دائم با سیگنالهای دریافتی از طرف ماهواره سنکرون می شود کار می کنند. گیرنده هر ماهواره را با استفاده از C/A مشخصی که دارد شناسایی می کند، سپس با توجه به سنکرون بودن گیرنده با ماهواره، هنگامی که ماهواره کد PRN مخصوص خود را ارسال می کند، گیرنده نیز درست در همان لحظه این کد را تولید می کند سپس اختلاف زمانی بین هر دو کد را محاسبه می کند و از این طریق فاصله بین ماهواره تا خودش را بدست می آورد. به این روش pseudorange گفته می شود سپس با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده از Navigation Message در مورد موقعیت ماهواره و جمع آوری این اطلاعات برای سه یا چهار ماهواره دیگر بصورت همزمان، امکان استفاده از روشهای Lateration را برلی محاسبه موقعیت به گیرنده GPS می دهد. منابع خطا در تخمین موقعیت GPS را می توان اثر یونسفر در سرعت انتشار، خطای Ephemeris مبنی بر موقعیت مداری ماهواره با توجه به این که تقریباً هر ۱۲ دقیقه یکبار ارسال می شود، خطای عدم سنکرون بودن با ماهواره، اعوجاج چند مسیره و خطاهای محاسباتی دانست. استفاده از دو کاربر این امکان را می دهد که خطای حاصل از یونسفر برای برخی از کاربران تصحیح شود. برای تصحیح خطای سنکرون بودن از تکنیک CPGF استفاده می شود. [۲۲]

- [1] Holger Karl and Andreas Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Chapter 9, *wiley press*, 2005
- [2] A. Savvides, C.-C. Han, and M. Srivastava. Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors. *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 166–179. ACM press, Rome, Italy, July 2001.
- [3] J.Li, J. Jannotti, D. S. J. DeCouto, D. R. Karger and R. Morris A Scalable Location Service for Geographic Ad-Hoc Routing *Proceedings of ACM Mobile Communications Conference*, August 6-11 2000, Boston, Massachusetts
- [4] K. Amouris, S. Papavassiliou, M. Li A Position-Based Multi-Zone Routing Protocol for Wide Area Mobile Ad-Hoc Networks. *Proceedings of VTC 99*
- [5] C. Savarese, J. Rabay, and K. Langendoen. Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the Annual USENIX Technical Conference*, Monterey, CA, 2002.
- [6] V. Ramadurai and M. L. Sichitiu. Localization in Wireless Sensor Networks: A Probabilistic Approach. In *Proceedings of 2003 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2003)*, pages 300–305, Las Vegas, NV, June 2003.
- [7] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan. The Cricket Location-Support System. In *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM Mobicom)*, Boston, MA, 2000.
- [8] A. Nasipuri and K. Li. A Directionality Based Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, September 2002.
- [9] P. Bahl and V. N. Padmanabhan. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, pages 775–784, Tel-Aviv, Israel, April 2000.
- [10] A. Harter and A. Hopper. A Distributed Location System for the Active Office. *IEEE Network*, 8(1): 62–70, January 1994.
- [11] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. A New Location Technique for the Active Office. *IEEE Personal Communications*, 4(5): 42–47, 1997.
- [12] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. GPS-Less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 7(5): 28–34, 2000.
- [13] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. Adaptive Beacon Placement. In *Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Mesa, AZ, 2001.
- [14] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher. Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks. *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 81–95. ACM Press, 2003.
- [15] A. Nasipuri and K. Li. A Directionality Based Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, September 2002.
- [16] L. C. Godara. Application of antenna arrays to mobile communications II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, 85:1195–1245, August 1997.
- [17] L. Doherty, L. El Ghaoui, and K. S. J. Pister. Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, pages 1655–1663, Anchorage, AK, April 2001.
- [18] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M. Fromberger. Localization from Mere Connectivity. In *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Annapolis, MD, 2003.
- [19] G. Jiang, W. Chung, and G. Cybenko. Semantic Agent Technologies for Tactical Sensor Networks. In *Proceedings of SPIE Conference on AeroSense*, Orlando, FL, April 2003.
- [20] D. Niculescu and B. Nath. Ad Hoc Positioning System (APS). In *Proceedings of IEEE GlobeCom*, San Antonio, AZ, November 2001.
- [21] N. Bulusu, J. Heidemann, V. Bychkovskiy, and D. Estrin. Density-Adaptive Beacon Placement Algorithms for Localization in Ad Hoc Wireless Networks. In *Proceedings of the INFOCOM*, New York, June 2002.
- [22] A. El-Rabbany, Introduction to GPS: the global positioning system, *wiley press*, 2002