الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة المعلوماتية

قسم النظم والشبكات الحاسوبية

كفاءة استهلاك الطاقة لبروتوكولات التوجيه المعتمدة على موقع العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية

بحث أعد لنيل درجة الماجستير في النظم والشبكات الحاسوبية

إعداد

المهندس محسن علي قاضي

إشراف

الدكتور المهندس إياد الخياط

العام ٢٠١٥

الإهداء

إلى أمي الحبيبة

إلى والدي الغالي

إلى أخواتي وإخوتي الأعزاء

إلى أصدقائي

شكر وتقدير

بعد الانتهاء من هذا العمل أتوجه بالشكر لله تعالى الذي منحني الإمكانية و هيأ لي الأسباب لإتمامه.

يشرفني بأن أتقدم بجزيل الشكر والتقدير والعرفان والجميل إلى أستاذي المشرف على هذا البحث، الدكتور إياد الخياط، لتفضله بالإشراف على هذا البحث ولما أفاض به عليّ من علمه الغزير وغمرني بأخلاقه العالية، حيث كان لملاحظاته القيمة و توجيهاته السديدة الأثر الكبير في إعداد البحث وإنجازه بهذا الشكل.

تقديري الخالص إلى السادة الأساتذة الأفاضل رئيس وأعضاء لجنة الحكم لتفضلهم بقبول مناقشة وتحكيم هذه الرسالة مع اعتزازي الكبير بكل ما سيقدمونه من ملاحظات علمية قيمة ستسهم في تصويب البحث وإثرائه.

الفهرس

العنوان الصفحة

الملخص باللغة العربية.. ١

الفصل الأول: مقدمة والهدف من البحث ودراسة مرجعية.. ٢

١-١ مقدمة وتعريف شبكات الحساسات اللاسلكية.. ٣

١-٢ أنواع المصادر والمصارف.. ٥

١-٣ المشكلة العلمية في مشروع البحث... ٥

١-٤ أهداف البحث.. ٥

١-٥ أهمية البحث... ٦

١-٦ الدراسات السابقة... ٦

الفصل الثاني: شبكات الحساسات وبنية الشبكة... ٨

٢-١ خصائص شبكات الحساسات اللاسلكية.. ١٠

٢-١-١ نوع الخدمة.. ١٠

٢-١-٢ جودة الخدمة... ١٠

٢-١-٣ سماحية الأخطاء... ١١

٢-١-٤ كفاءة استهلاك الطاقة.. ١٢

٢-١-٥ قابلية التوسع.. ١٣

٢-١-٦ عدم انتظام كثافة العقد ضمن الوسط... ١٣

العنوان	الصفحة

٢-١-٧ القدرة على الاستمرار.. ١٤

٢-١-٨ عدم التجانس في شبكات الحساسات اللاسلكية.. ١٤

٢-٢ التقنيات المستخدمة في شبكات الحساسات اللاسلكية.. ١٤

٢-٢-١ التنظيم الموزّع.. ١٥

٢-٢-٢ المعالجة ضمن الشبكة.. ١٥

٢-٢-٢-١ المراكمة أو التجميع.. ١٦

٢-٢-٢-٢ الضغط والترميز الموزّع.. ١٧

٢-٢-٢-٣ الرماز المتنقّل والتشبيك المعتمد على الوكيل.. ١٨

٢-٢-٣ مركزية البيانات.. ١٩

٢-٢-٣-١ عنونة البيانات وليس العقد.. ١٩

٢-٢-٣-٢ النشر والاشتراك.. ٢٠

٢-٢-٤ الاتصالات اللاسلكية متعددة القفزات.. ٢٠

٢-٢-٥ التهيئة التلقائية.. ٢٢

٢-٢-٦ المحليّة.. ٢٢

٢-٣ أنواع تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية.. ٢٣

٢-٤ تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية.. ٢٤

العنوان	الصفحة

<u>الفصل الثالث: تقنيات تحديد المواقع في شبكات الحساسات اللاسلكية</u>........................ **٢٨**

٣-١ خصائص تحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية........................ ٣٠

٣-٢ الإشارة المستخدمة.. ٣٢

٣-٣ طرق تحديد الموقع.. ٣٢

٣-٤ القياسات المستخدمة لتحديد الموقع.. ٣٤

٣-٤-١ مؤشر قوة الإشارة المستقبلة.. ٣٥

٣-٤-٢ زمن الوصول.. ٣٧

٣-٤-٣ فرق توقيت الوصول.. ٣٨

٣-٤-٤ الأساس الرياضي لتقنية Multilateration.................................. ٣٩

٣-٥ تحديد الموقع لقفزة واحدة.. ٤٠

٣-٦ تحديد الموقع في بيئة مكوّنة من عدة قفزات................................ ٤٥

٣-٧ الخلاصة ٥٠

<u>الفصل الرابع: بروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية</u>........................ **٥١**

٤-١ بنية الشبكة وأثرها في بروتوكولات التوجيه.................................. ٥٣

٤-٢ بروتوكولات التوجيه مركزية البيانات.. ٥٦

٤-٢-١ الإغراق ونشر الإشاعات.. ٥٧

٤-٢-٢ بروتوكول الحساسات للحصول على المعلومات عن طريق التفاوض.................. ٥٨

العنوان الصفحة

٤-٢-٣ النشر الموجه..٦٠

٤-٢-٤ التوجيه المدرك للطاقة...٦٢

٤-٢-٥ التوجيه بالإشاعات..٦٤

٤-٢-٦ التوجيه المعتمد على درجة التحدر..٦٥

٤-٢-٧ توجيه النشر المقيد الغير متماثل المناحي...٦٦

٤-٢-٨ بروتوكول COUGAR...٦٦

٤-٢-٩ بوتوكول ACQUIRE...٦٨

٤-٣ البروتوكولات الهرمية...٦٩

٤-٣-١ بروتوكول LEACH...٧٠

٤-٣-٢ بروتوكولي PEGASIS و Hierarchical PEGASIS..................................٧١

٤-٣-٣ بروتوكولي TEEN و APTEEN..٧٤

٤-٣-٤ التوجيه المدرك للطاقة...٧٦

٤-٣-٥ بروتوكول التنظيم الذاتي...٧٨

٤-٤ بروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع..٧٩

٤-٤-١ خوارزمية التقدم الطامع..٨٠

٤-٤-٢ بروتوكول GAF...٨٣

٤-٤-٣ بروتوكول GEAR...٨٥

العنوان الصفحة

٤-٤-٤ بروتوكول GeRaf...٨٧

٤-٤-٥ بروتوكول MECF..٨٩

٤-٥ بروتوكولات التوجيه التي تعتمد على نمذجة التدفق ضمن الشبكة.................................٩٠

٤-٥-١ بروتوكول MLER..٩٠

٤-٥-٢ بروتوكول MLDG..٩١

٤-٥-٣ بروتوكول SAR...٩٢

٤-٥-٤ بروتوكول SPEED...٩٣

٤-٦ الخلاصة ٩٤

الفصل الخامس: التحليل الرياضي...**٩٥**

٥-١ النموذج الرياضي للأخطاء في مواقع العقد...٩٦

٥-١-١ الخطأ في موقع العقدة...٩٨

٥-١-٢ تابع الكثافة الاحتمالي للمسافة الحقيقية بين عقدتين....................................٩٩

٥-٢ الفشل في الإرسال...١٠١

٥-٣ أثر الخطأ في الموقع على بروتوكولات التوجيه الجغرافية.......................................١٠٤

الفصل السادس: المحاكاة والنتائج...**١٠٦**

٦-١ الحالة الأولى..١٠٨

٦-٢ الحالة الثانية...١٠٩

العنوان	الصفحة

٦-٣ الخاتمة والأعمال المستقبلية..١١١

الملخص باللغة الانكليزية Abstract...١١٣

المصطلحات ١١٤

المراجع...١١٦

فهرس الأشكال:

الشكل الصفحة

الفصل الأول..

شكل(١.١) بنية العقدة الحسّاسة...٤

شكل(٢.١) الشكل العام لشبكة الحساسات...٤

الفصل الثاني...

شكل(١.٢)تجميع البيانات...١٧

شكل (٢.٢) الخفوت الذي تتعرض له الإشارة الراديوية في حالتي قفزة وحيدة وعدة قفزات..............٢١

الاتصال متعدد القفزات لتجاوز العوائق شكل(٣.٢).......................................٢٢

الفصل الثالث...

شكل (١.٣) تحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية بالاعتماد على العقد المرشدة..............٣٢

شكل (٢.٣) طريقة Lateration لتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية......................٣٣

شكل (٣.٣) طريقة Angulation لتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية......................٣٥

شكل (٤.٣) تابع الكثافة الاحتمالي للمسافة وذلك بالنسبة لقيمة محددة لـRSSI.......................٣٦

شكل (٥.٣) عدة توابع كثافة احتمالية للمسافة وذلك لقيم مختلفة لـ RSSI...........................٣٧

شكل (٦.٣) آلية عمل منظومة الاتصالية المتداخلة..٤٢

شكل (٧.٣) آلية عمل منظومة النقطة التقريبية في المثلث......................................٤٣

شكل (٨.٣) الاختبار الذي تقوم به العقدة لتحديد إذا كانت داخل المثلث أو خارجه.....................٤٤

الشكل	الصفحة

شكل (٩.٣) تحديد الموقع باستخدام الحزمة الدوارة..٤٥

شكل (١٠.٣) عدم إبعاد العقد عن بعضها في طريقة صياغة الإمكانية................................٤٦

شكل (١١.٣) حساب المسافة الإقليدية في غياب الاتصال المباشر...................................٤٧

شكل (١٢.٣) تكرار عملية Multilateration...٤٨

شكل (١٣.٣) مشكلة Multilateration التكراري...٤٩

الفصل الرابع..

شكل (٤-١) الانفجار الداخلي..٥٨

شكل (٤-٢) التداخل..٥٨

شكل (٤-٣) بروتوكول SPIN..٥٩

شكل (٤-٤) بروتوكول النشر الموجه...٦١

شكل (٤-٥) خطة استعلام خاصة بالعبّارة...٦٧

شكل (٤-٦) تشكيل السلاسل في بروتوكول PEGASIS...٧١

شكل (٤-٧) تجميع البيانات ضمن السلاسل...٧٣

شكل (٤-٨) العنقدة الهرمية..٧٤

شكل (٤-٩) بنية العنقود..٧٧

شكل (٤-١٠) خوارزمية التقدم الطامع...٨٠

شكل (٤-١١) فشل خوارزمية التقدم الطامع..٨١

الصفحة | الشكل

شكل (٤-١٢) خوارزمية التوجيه الوجهي..٨٢

شكل (٤-١٣) العبور باستخدام التوجيه الوجهي..٨٢

شكل(٤-١٤) بروتوكول GAF والشبكات الافتراضية..٨٤

شكل (٤-١٥) حالات العقد في بروتوكول GAF..٨٤

شكل (٤-١٦) التسير الجغرافي العودي..٨٧

شكل (٤-١٧) آلية عمل MECF..٩٠

شكل (٤-١٨) مكونات بروتوكول SPEED..٩٣

الفصل الخامس..

شكل (١.٥) تابع الكثافة الاحتمالي للتوزيع الطبيعي..٩٧

شكل (٢.٥) يوضح المسافة الحقيقية والمسافة المقاسة بين العقد..٩٧

شكل (٣.٥) تابع الكثافة الاحتمالية لتوزيع Rayleigh..٩٩

شكل (٤.٥) تابع الكثافة الاحتمالية لتوزيع Rician..١٠٠

شكل (٥.٥) تابع Bassel المعدّل من النوع الأول..١٠١

شكل (٦.٥) تابع Marcum من الدرجة الأولى..١٠٢

شكل (٧.٥) احتمال الفشل في الإرسال بالنسبة للانحراف المعياري..١٠٣

شكل (٨.٥) احتمال الفشل في الإرسال بالنسبة للمسافة المقاسة بين العقد..١٠٣

شكل (٩.٥) الحالة الأولى..١٠٤

الشكل الصفحة

شكل (١٠.٥) الحالة الثانية..١٠٥

شكل (١١.٥) الحالة الثالثة..١٠٥

شكل (١٢.٥) الحالة الرابعة..١٠٥

الفصل السادس..

شكل(٦-١) العلاقة بين استهلاك الطاقة و عدد العقد.................................١٠٨

شكل(٦-٢) العلاقة بين عدد القفزات وعدد العقد.....................................١٠٨

شكل(٦-٣) بروتوكول GeRaf، استهلاك الطاقة بالمقارنة مع عدد العقد بالنسبة لعدة قيم للانحراف المعياري...١٠٩

شكل(٦-٤) بروتوكول MECF، استهلاك الطاقة بالمقارنة مع عدد العقد بالنسبة لعدة قيم للانحراف المعياري...١١٠

شكل(٦-٥) العلاقة بين استهلاك الطاقة والانحراف المعياري للأخطاء..............................١١١

الفصل الأول: مقدمة والهدف من البحث ودراسة مرجعية

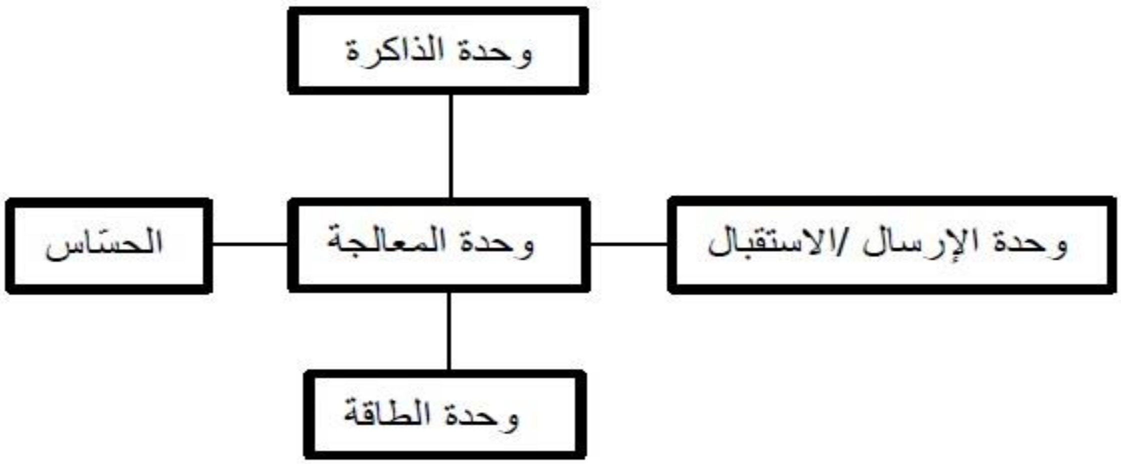
١-١ تعريف شبكات الحساسات اللاسلكية:

إن التطور الكبير في التشبيك اللاسلكي وصناعة الدارات المتكاملة و الأنظمة الالكتروميكانيكية والمعالجات الصغرية Microprocessor المدمجة، أدّى لظهور جيل جديد من شبكات الحساسات اللاسلكية، والتي تناسب مجموعة من التطبيقات التجارية والصناعية والعسكرية، ومن المتوقع أن تسبب هذه التقانة ثورة في طريقة عيشنا وعملنا وتفاعلنا مع البيئة المحيطة بنا، وذلك من خلال نشر حساسات صغيرة الحجم ورخيصة الثمن على الطرقات والجدران والآلات بحيث تشكل هذه الحساسات قشرة رقمية Digital skin تستطيع استشعار مختلف الظواهر الفيزيائية قيد الدراسة (مثل مراقبة حركة المركبات والكائنات الحية ضمن بيئتها، الكشف المبكر عن الحرائق في الغابات، مراقبة خطوط الانتاج في المصانع.....)، وبالتالي باستطاعة هذه الشبكات تزويد مشغليها بمعلومات دقيقة وحديثة قادمة مباشرة من بيئة الظاهرة قيد الدراسة.

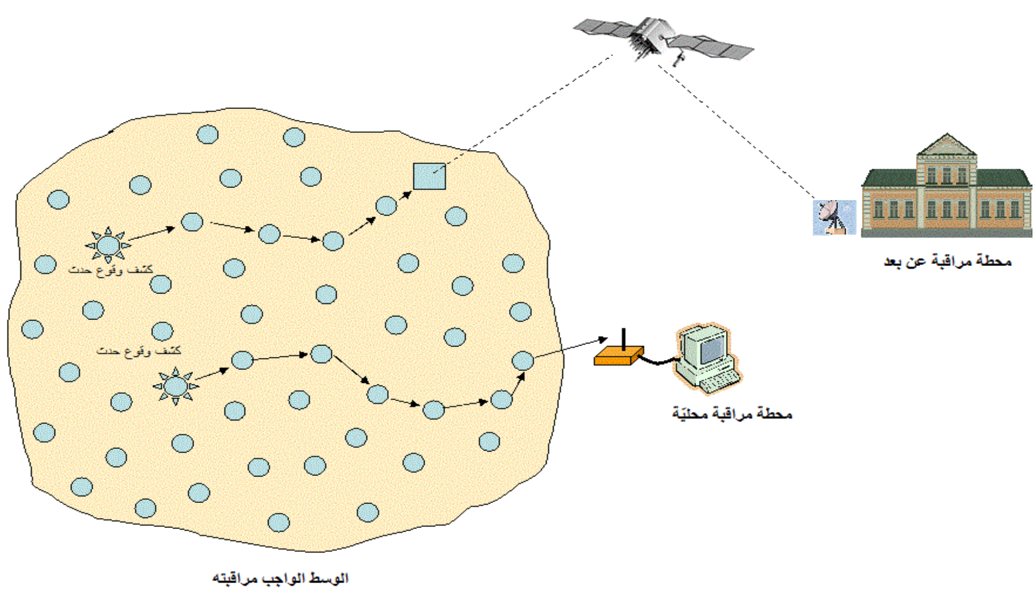
تعرّف شبكات الحساسات اللاسلكية على أنها مجموعة من العقد الحسّاسة القادرة على استشعار الوسط المحيط وذلك لتحقيق هدف محدد، وتقوم هذه العقد بنقل المعطيات الناتجة عن عملية الاستشعار إلى العقدة المصرف Sink، وتتصل العقد الحسّاسة مع بعضها البعض بروابط لاسلكية وبدون استخدام بنية تحتية محددة. تتميز شبكات الحساسات اللاسلكية بمحدودية موارد العقد المكونة لها من حيث مدى الإرسال وعرض الحزمة المتاحة وقدرة هذه العقد على المعالجة والتخزين، بالإضافة إلى محدودية مصادر الطاقة التي تغذي هذه العقد (معظم العقد تعتمد على مدخرات غير قابلة لإعادة الشحن أو التبديل)[1].

وفيما يلي تعريف بعض المصطلحات الخاصة بهذه الشبكات:

- الحسّاس: هو عبارة عن محوّل يقوم بتحويل ظاهرة فيزيائية ما مثل درجة الحرارة أو الإضاءة أو الصوت والحركة... إلى إشارات (كهربائية أو غير كهربائية) ليتم معالجتها من قبل معدات أخرى.
- العقدة الحسّاسة: هي الوحدة الأساسية في شبكات الحساسات اللاسلكية، تتكون من حسّاس وذاكرة ومعالج ومرسل ومستقبل لاسلكي جميعها مدمجة، بالإضافة إلى مصدر طاقة، سنعتمد في هذه الدراسة التسميتين عقدة و حسّاس للدلالة على العقدة الحسّاسة.



شكل(١.١) بنية العقدة الحسّاسة



شكل(٢.١) الشكل العام لشبكة الحساسات

١-٢ أنواع المصادر والمصارف:

المصدر هو عبارة عن حساس من الشبكة بإمكانه جمع معلومات عن الوسط المحيط به وارسالها إلى المصرف، قد يزود الحساس بمحرّك ميكانيكي (Actuator) ليتمكن من التفاعل مع الوسط.

المصرف هو عبارة عن كيان تُرسل البيانات اليه، من الممكن أن يكون عبارة عن عقدة من عقد الشبكة، أو عبارة عن كيان خارج الشبكة كالمساعدات الرقمية (PDA) يتواصل مع الشبكة (كما في حالة مكافحة الحرائق)، أو عبّارة (Gateway) لشبكة أخرى مثل الانترنت، وفي هذه الحالة يتم طلب البيانات عن طريق محطات بعيدة، تتواصل مع الشبكة عن طريق المصرف كما يوضح الشكل(٢.١).

١-٣ المشكلة العلمية في مشروع البحث:

تكمن مشكلة البحث في أن النماذج النظرية المقترحة لبروتوكولات التوجيه المعتمدة على موقع العقد تفترض أن مواقع العقد محددة بشكل دقيق، ولكن في الحقيقة يوجد نسبة من الخطأ في تحديد مواقع العقد، وهذا يؤدي إلى انخفاض في أداء هذه البروتوكولات من حيث:

- معدّل تسليم الرزم (Packet delivery ratio).
- كفاءة استهلاك الطاقة (Energy consumption efficiency).

سيتم التركيز في هذا البحث على فعالية استهلاك الطاقة في هذه البروتوكولات لما لها من أثر كبير على ارتباطية العقد في الشبكة (Network connectivity) وإطالة عمر هذه الشبكات (Network lifetime) إلى أقصى حد ممكن، وذلك بفرض أن العقد في شبكة الحساسات اللاسلكية ثابتة الموقع.

١-٤ أهداف البحث:

يهدف هذا البحث إلى:

- تقديم نموذجٍ رياضيٍّ يمثل الاخطاء في مواقع العقد ضمن شبكات الحساسات اللاسلكية.
- دراسة أثر الأخطاء في مواقع العقد على استهلاك الطاقة ضمن بروتوكولات التوجيه المعتمدة على مواقع العقد وذلك بالاعتماد على النموذج الرياضي المقدّم.

- التحقق من صحة النموذج الرياضي المقترح عن طريق المحاكاة لبروتوكولات توجيه معتمدة على مواقع العقد في الحالتين التاليتين:
  - عدم وجود أخطاء في مواقع العقد.
  - وجود أخطاء في مواقع العقد.
- مقارنة أداء البروتوكولات في الحالتين السابقتين وذلك لمعرفة أثر الأخطاء في مواقع العقد على أداء هذه البروتوكولات.

١-٥ أهمية البحث:

يعدُّ التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية ميداناً واسعاً للأبحاث، لما له من أثر كبير على أداء هذه الشبكات من ناحية استهلاك الطاقة ومعدل تسليم الرزم واتصالية العقد والتأخير الزمني لتسليم الرزم، وجودة تسليم الرزم. قدمت هذه الدارسة نموذجاً رياضياً يمثّل الأخطاء في مواقع العقد في هذه الشبكات، ويساعد في فهم أثر هذه الأخطاء على استهلاك الطاقة في هذه البروتوكولات. وذلك بهدف رفع كفاءة هذا الاستهلاك ضمن هذا النوع من البروتوكولات و زيادة العمر التشغيلي للشبكة لأقصى حد ممكن.

١- ٦ الدراسات السابقة:

تعتبر شبكات الحساسات اللاسلكية من أهم تقانات القرن الواحد والعشرين، وحظيت بنصيب وافر من الأبحاث التي درست التحديات التي تواجه نشر هذه التقانة.

ومن هذه الأبحاث نذكر:

- قام الباحثون باستعراض الطرق المستخدمة في دراسة و تقييم أثر الأخطاء في مواقع العقد (الناتجة عن خوارزميات تحديد الموقع) على تطبيقات وبروتوكولات شبكات الحساسات اللاسلكية [1].
- تمّ دراسة بعض المعاملات التي تسبب الأخطاء في تحديد موقع العقد (التركيز على الأخطاء الناتجة عن عدم دقة عمليات القياس المتبادلة بين العقد)، ومن ثم ربطها بتابع توزيع احتمالي يمثل النمذجة الرياضية للمعاملات التي تمت دراستها [2].
- قام الباحثون بدراسة أداء بروتوكولات التوجيه المعتمدة على موقع العقد في حال وجود أخطاء في مواقع العقد، وذلك باعتماد الطريقة التحليلية والمحاكاة. ركّزت الدراسة على أثر الأخطاء في موقع العقد على معدّل تسليم الرزم، ودراسة أثر وجود العوائق ضمن الشبكة على أداء هذه البروتوكولات.

أظهرت الدراسة أنّه في حال وجود نسبة خطأ في مواقع العقد تساوي ٢٠% من مدى إرسال العقد فإنه يحصل انخفاض ملحوظ في أداء هذه البروتوكولات [4].

- تم تقديم دراسة موسعة عن بروتوكولات التوجيه المعتمدة على موقع العقد، وفوائد هذه البروتوكولات والتحديات التي تواجهها. وقد قام الباحثون بتصنيف هذه البروتوكولات إلى مجموعات بناءً على الميزات التي وفرها هذه البروتوكولات وقدرتها على الإيفاء بمتطلبات تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية [5].
- قدّم الباحثون عرضاً وافياً لبروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية، مع إيضاح أهم التحديات التصميمية لهذه البروتوكولات مع التركيز على فعالية استهلاك الطاقة وبالتالي إطالة عمر شبكة الحساسات لأقصى درجة ممكنة [6].

الفصل الثاني: شبكات الحساسات وبنية الشبكة

تخضع شبكات الحساسات اللاسلكية لمجموعة من القيود الخاصة بها مثل محدودية مصدر طاقة العقد(بالغالب تكون العقد مزودة ببطارية مدمجة)، ومحدودية عرض الحزمة الخاصة بالاتصالات. تمتلك الحساسات معالجات صغرية مدمجة وكمية صغيرة من الذاكرة لمعالجة الإشارة وجدولة المهام، بالإضافة إلى أنها مزودة بواحدة أو أكثر من أجهزة الاستشعار (حساس ضوء ، حرارة، رطوبة، ضغط....). يتصل كل حساس من هذه الحساسات بوصلات لاسلكية مع مجموعة من الحساسات المجاورة والتي تقع ضمن مدى إرساله.

من المعروف أن إرسال خانة واحدة Bit باستخدام وسط إرسال لاسلكي وضمن مدى إرسال قصير يستهلك كمية من الطاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لمعالجة هذه الخانة، وبالتالي فإن الاتصالات اللاسلكية هي المستهلك الأكبر للطاقة في الشبكات اللاسلكية ضمن المدى المنظور[13] ، لذلك فإن تقليل عمليات الإرسال والاستقبال ومدى الإرسال اللاسلكي لأقصى درجة ممكنة من شأنه إطالة عمر الشبكة، ويمكن أن يتم ذلك عن طريق التعاون والتنسيق بين الحساسات المتجاورة وحذف البيانات المكررة بالإضافة إلى استخدام مدى إرسال قصير للأمواج الراديوية يحسّن كفاءة استخدام الطيف الترددي المتاح عن طريق تقليل عمليات التداخل والتشويش بين الترددات المستخدمة وبالتالي زيادة معدّل البيانات المرسلة عبر القناة اللاسلكية خلال واحدة الزمن.

إن تحسين أداء هذه الشبكات والاستخدام الأمثل للموارد المحدودة يتطلب إعادة التفكير في نموذج (TCP/IP)، وتصميم نموذج آخر يتلاءم مع طبيعة هذه الشبكات ويسهّل عملية تطوير التطبيقات الخاصة بها. بالنسبة لكثير من تطبيقات هذه الشبكات من الملائم عنونة العقد باستخدام الخصائص الفيزيائية لهذه العقد كالموقع عوضاً عن استخدام عنوان IP، كما أن طريقة توليد البيانات من قبل الحساسات (دورية، عند وقوع حدث...)وإلى أين سيتم نقلها تؤثران على عملية ضغط وتجميع البيانات، وعلى عملية التوجيه مع الأخذ بعين الاعتبار أن الحساسات تتصل مع بعضها البعض وفق نموذج الند للند (Peer to Peer) باستخدام روابط لاسلكية غير مستقرة (بسبب طبيعة الوصلة اللاسلكية وتأثرها بالوسط المحيط) وغير متجانسة (بسبب وجود حساسات بالشبكة مختلفة من حيث مدى الإرسال اللاسلكي).

سنقدم فيما يلي خصائص شبكات الحساسات اللاسلكية، والتقنيات الجديدة التي تعتمدها لتحقيق متطلبات تطبيقات هذه الشبكات وعدد من هذه التطبيقات.

٢-١ خصائص شبكات الحساسات اللاسلكية:

تشمل تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية طيف واسع من المجالات، حيث لا يمكن لنموذج واحد من هذه الشبكات أن يغطي كل متطلبات هذه التطبيقات بالمقابل تتقاطع هذه التطبيقات مع بعضها البعض في عدد من الخصائص والمتطلبات، ومن الخصائص المشتركة بين معظم تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية:

٢-١-١ نوع الخدمة :

يختلف مفهوم نوع الخدمة في شبكات الحساسات اللاسلكية عنه في الشبكات التقليدية. تقوم الشبكات التقليدية بنقل الخانات (bits) من مكان لآخر،أما شبكات الحساسات اللاسلكية فتعتبر أن نقل الخانات هو مجرّد وسيلة للوصول لهدف الشبكة في تقديم معلومات مفيدة عن الوسط و التفاعل مع تغير شروطه.

٢-١-٢ جودة الخدمة:

تختلف شبكات الحساسات اللاسلكية عن الشبكات التقليدية في نوع الخدمة التي تقدمها، فالشبكات التقليدية تقوم بنقل البيانات من مكان لآخر مع إمكانية إضافة متطلبات تمثل مستوى الخدمة التي يمكن لهذه الشبكة تقديمه وخاصة إذا كانت هذه الشبكة تستخدم لتطبيقات الوسائط المتعددة. تصنّف متطلبات جودة الخدمة في صنفين، الأول على مستوى التجهيزات المستخدمة في الشبكة مثل عرض الحزمة والتأخير الزمني ومعدل فقد الرزم و عدم استقرار الإرسال (Jitter)، والثاني على مستوى مستخدم هذه الشبكة مثل الجودة المتوقعة للصوت أو للصوت والصورة معاً.

يمكن تطبيق بعض متطلبات الصنف الأول بدرجة معينة على شبكات الحساسات اللاسلكية، كمعدل فقد الرزم والتأخير الزمني في حين عرض الحزمة لا يمكن تطبيقه، وتعتمد متطلبات الصنف الثاني على التطبيق الذي يستخدم الشبكة ومن الممكن أن تكون هذه المتطلبات:

١- احتمال الكشف والإبلاغ عن وقوع حدث:

ما هو احتمال أن لا يتم اكتشاف وقوع حدث، أو عدم إبلاغ المصرف عن وقوع هذا الحدث، فعلى سبيل المثال عدم الإبلاغ عن خطر وقوع حريق يعتبر قصوراً حاداً في عمل الشبكة. يحدد التطبيق أهمية هذا الاحتمال الذي يتأثر بعدة عوامل ضمن الشبكة مثل كثافة العقد وعمر الشبكة.

٢- مقدار الخطأ في تصنيف الأحداث:

بعض شبكات الحساسات تكون مسؤولة عن كشف ومتابعة عدة أحداث، ويُعرّف الخطأ في تصنيف الحدث بأنه مقدار الخطأ في التمييز بين أنواع الأحداث قيد الاهتمام.

٣- التأخير في كشف الأحداث:

وهو الفترة الزمنية التي تفصل بين كشف وقوع الحدث وإبلاغ جميع المصارف المهتمّة بوقوعه، تستمد هذه الفترة أهميتها من حساسية التطبيق الذي يستخدم الشبكة.

٤- التقارير المفقودة:

إذا تطلّب التطبيق إرسال تقارير دورية إلى المصرف، فيجب أن تكون نسبة التقارير المفقودة ضمن الحدود التي يفرضها التطبيق.

٥- دقة التقريب:

بعض التطبيقات تتضمن عمليات تقدير، كتقدير درجة الحرارة كتابع للموقع ضمن الوسط. يجب أن تكون هوامش الخطأ النسبية والمطلقة في عمليات التقدير ضمن حدود متطلبات التطبيق.

٦- دقة الملاحقة:

في تطبيقات متابعة الأهداف، يتوجب على الشبكة تزويد المصارف بتقارير عن موقع الهدف، أيضاً ضمن هوامش الخطأ التي يفرضها التطبيق.

٢-١-٣ سماحية الأخطاء:

تكون الحساسات عرضة للخروج من الشبكة نتيجة نفاذ مصدر الطاقة أو عطل في تجهيزات الحساس، كما أن الروابط اللاسلكية بين العقد تتأثر بعوامل الوسط مما يؤدي للتشويش وعدم استقرار هذه الروابط، هذا ما يفرض على شبكات الحساسات أن تكون قادرة على تجاوز خروج بعض العقد من الشبكة (يمكن أن يتم

ذلك عن طريق زيادة عدد الحساسات للحصول على حساسات احتياطية قادرة على تغطية خروج بعض الحساسات...) .

٢-١-٤ كفاءة استهلاك الطاقة:

تعتبر الطاقة من الموارد المحدودة في شبكات الحساسات اللاسلكية التي لها أثر كبير على أداء هذه الشبكات، لذلك لا بد من أن يتم استخدام الطاقة ضمن هذه الشبكات بشكل أمثلي. يظهر أثر الطاقة على معظم معايير جودة الخدمة المقدمة من قبل هذه الشبكات، حيث أن هذه المعايير تتحسن عند ازدياد استهلاك الطاقة من قبل الحساسات، باستثناء دقّة التقريب وتتبع الأهداف التي تعتمد بشكل رئيسي على كثافة عقد الشبكة، لذلك يجب الأخذ بعين الاعتبار جودة الخدمة المطلوبة من قبل التطبيق والتي يجب على الشبكة تأمينها، ومقدار الطاقة اللازم لتحقيق ذلك لنحصل على تصوّر أولي لكفاءة استهلاك الطاقة لهذا التطبيق. يشمل مصطلح كفاءة استهلاك الطاقة في شبكات الحساسات عدة مفاهيم،ومن هذه المفاهيم:

١. **الطاقة اللازمة لاستلام خانة بشكل صحيح:**

ما هو متوسط مقدار الطاقة اللازمة لإرسال خانة واحدة من المعلومات من المصدر إلى المصرف مروراً بالعقد الوسيطة، مع الأخذ بعين الاعتبار كل المكونات التي تشترك بهذه العملية وتستهلك طاقة. تعتبر هذه القيمة مقياساً جيّداً من أجل التطبيقات التي تحتاج إلى تقارير دورية عن البيئة التي تم نشر الشبكة فيها.

٢. **الطاقة المستهلكة للإبلاغ عن وقوع حدث:**

ما هو متوسط مقدار الطاقة اللازمة للإبلاغ عن وقوع حدث ما، وذلك من أجل حدث غير مكرر كون المعلومات المكررة لا تؤمن أي معلومات جديدة.

٣. **المقايضة بين الطاقة والتأخير الزمني:Delay/energy trade-off**

في حال التطبيق يشمل متابعة عدة أحداث، وهذه الأحداث متفاوتة في درجة الأهمية. يمكن استثمار مقدار أكبر من الطاقة للإبلاغ عن الأحداث ذات الأهمية العالية لتسريع هذه العملية، وتخفيض مقدار الطاقة بالنسبة للأحداث ذات الأهمية الأقل.

٤. **فترة حياة الشبكة: Network life time**

معظم تطبيقات شبكات الحساسات تفرض على الحساسات الاعتماد على مصادر طاقة محدودة كالمدخرات، بالإضافة إلى أن استبدال هذه المدخرات أثناء العمل غير ممكن في أغلب الأحيان، مما يمثل تحدّياً لهذه الحساسات لانجاز المهام الموكلة إليها لأطول فترة ممكنة، لذلك تعتبر فترة حياة الشبكة من الخصائص الأساسية الواجب تحسينها من خلال ضمان كفاءة استهلاك الطاقة في الحساسات أثناء قيامها بالمهام الموكلة إليها.

بعض شبكات الحساسات تعتمد على مصدر طاقة متجدد بالإضافة للمدخرات القابلة لإعادة الشحن (Energy harvesting)، حيث تقوم الحساسات بالاعتماد على الوسط لتوليد جزء من الطاقة التي تستهلكها في عملياتها، وهذا ما يجعل فترة حياة الشبكة من الناحية النظرية غير منتهية. ترتبط مدة حياة الشبكة بجودة الخدمة التي تقدمها الشبكة، فاستهلاك المزيد من الطاقة في عمليات الشبكة من شأنه رفع موثوقية الخدمة المقدمة من الشبكة وتقليل حياة الشبكة، مما يفرض إيجاد توازن بين هذين العاملين بناءً على نوع التطبيق.

بعض التطبيقات تعرف فترة حياة الشبكة بأنها الوقت المنقضي لحين خروج أول عقدة من الشبكة بسبب نفاذ الطاقة، بعضها الآخر يعرّفه على أنها الفترة الزمنية لحين انقسام الشبكة لعدة أقسام لا يوجد اتصال بينها، أو لحين خروج ٥٠% من العقد من الشبكة بسبب نفاذ الطاقة، أو لحين وجود منطقة ضمن بيئة عمل الشبكة غير مغطاة بأي حساس[15].

٢-١-٥ قابلية التوسع: Scalability

تعتمد هذه الشبكات على وجود عدد كبير من الحساسات، ويتوّجب على البروتوكولات القدرة على التعامل مع هذا العدد الكبير من العقد.

٢-١-٦ عدم انتظام كثافة العقد ضمن الوسط: Wide range of density

تعرّف كثافة الشبكة بأنها عدد العقد الموجودة في واحدة المساحة[17]، تختلف هذه الكثافة بحسب احتياجات التطبيق و من منطقة لأخرى ضمن الوسط مع تقدّم الزمن نتيجة خروج بعض العقد أو بسبب النشر العشوائي للحساسات، يتوجّب على شبكات الحساسات التكيّف والتعامل مع هذه الخاصية.

٢-١-٧ القدرة على الاستمرار: Maintainability

تخضع شبكات الحساسات لتغير شروط الوسط المحيط و تغير طبولوجية الشبكة نتيجة خروج بعض الحساسات من الشبكة، أو تغير المهام المطلوبة من الشبكة، مما يفرض على الشبكة إيجاد آلية للتكيف مع الشروط الجديدة (للوسط والشبكة والمهام)، بالإضافة لقدرتها على مراقبة حالتها بهدف تغير معاملاتها التشغيلية (مستوى الخدمة المقدّمة عند انخفاض مستوى الطاقة في العقد...)[14] .

٢-١-٨ عدم التجانس في شبكات الحساسات اللاسلكية: Heterogeneity

من الممكن أن تكون شبكة الحساسات في لحظة نشرها في الوسط مؤلفة من عقد غير متجانسة من حيث الموارد (طاقة، مدى الإرسال، قدرة المعالجة، الذاكرة)، ومن الممكن أن يكون عدم تجانس العقد ناتج عن عمل الشبكة لفترة من الزمن، أثناء فترة عمل الشبكة يتم إسناد مهام لبعض العقد أكثر من باقي العقد، مما يؤدي استهلاك مواردها بشكل أسرع، وبعض العقد تكون قادرة على استخلاص الطاقة من الوسط بشكل أفضل من غيرها. ينتج عن انعدام التجانس سيئات ومحاسن، من المحاسن إمكانية إسناد المهام للعقد بشكل غير متماثل، فالعقد ذات الموارد الأكثر يسند إليها المهام التي تتطلب موارد أكثر، فعلى سبيل المثال العقد التي تمتلك قدرة معالجة كبيرة وذاكرة يمكن أن توكل إليها مهمّة تجميع البيانات، والعقد التي لديها مقدار كبير من الطاقة يمكن الاعتماد عليها في عمليات التنسيق المحلية بين العقد. من المساوئ أن عدم التجانس يفرض إسناد المهام بشكل غير متماثل، وهذا الإسناد يحتاج لمراجعة دورية مع مرور الوقت، وذلك بسبب تغير حالات العقد، بالإضافة إلى أن عمليات مراجعة إسناد المهام ينتج عنها حمل زائد على الشبكة.

٢-٢ التقنيات المستخدمة في شبكات الحساسات اللاسلكية:

يجب أن تضمن شبكة الحساسات اللاسلكية مستوى جودة خدمة وكفاءة استهلاك طاقة وقدرة على التوسّع لملائمة احتياجات التطبيق، لكن هذه المتطلبات بحد ذاتها لا تعطي أي فكرة عن بنية الشبكة اللازمة لضمان تحقيق هذه المتطلبات، سنقدم فيما يلي مجموعة من القواعد التي يجب اعتمادها في تصميم شبكات الحساسات والتي من شأنها المساعدة في تحقيق متطلبات هذه الشبكات[16][15].

٢-٢-١ التنظيم الموزّع:

إن ضمان قابلية شبكات الحساسات اللاسلكية للتوسع يفرض أن يتم تنظيم هذه الشبكات بشكل موزّع، أي أنه لا يوجد كيان مركزي مسؤول عن إدارة الوصول للوسط واتخاذ قرارات التوجيه، كما هو الحال في المحطّة الرئيسية (Base station) في شبكات الهاتف المحمول. النموذج المركزي غير قابل للتطبيق في شبكات الحساسات كونه يفرض وجود نقطة وحيدة في الشبكة تسبب فشل كامل الشبكة، بالإضافة لصعوبة تطبيق هذا النموذج في بيئة اتصالات لاسلكية كل مكوناتها لها مدى إرسال محدود ومصادر طاقة ومعالجة محدودة.

في النموذج الموزّع تقوم عقد الشبكة بالتعاون بهدف تنظيم الشبكة باستخدام خوارزميات وبروتوكولات موزّعة، والذي اصطلح على تسميته بالتنظيم الذاتي (Self-organization). يجب الانتباه أيضاً إلى القصور الذي يعاني منه تنظيم الشبكة بشكل موزّع، ففي الكثير من الحالات تقدّم الحلول المعتمدة على التنظيم المركزي أداء أفضل في استثمار الموارد المتاحة (الطاقة، عرض الحزمة....)، وبهدف ضمان الحصول على هذه الميزة يمكن تطبيق نموذج مركزي بشكل محلّي، وذلك عن طريق الانتخاب الديناميكي لحساس من مجموعة الحساسات المتجاورة، يتولّى هذا الحساس مهام إدارة هذه الحساسات كإدارة الوصول للوسط. إن عملية الانتخاب هذه تؤدي لإيجاد بنية هرمية ديناميكية للشبكة، مع ملاحظة أنّه يتوجب تكرار عملية الانتخاب بشكل مستمر بهدف توزيع الحمل على العقد ومنع استهلاك موارد عقد محددة في الشبكة، بالإضافة إلى أن هذه العملية تخضع لقواعد وشروط لبدئها تعتمد على حالة العقد و مواردها تختلف من تطبيق لآخر.

٢-٢-٢ المعالجة ضمن الشبكة: In network processing

إنّ تنظيم الشبكة بشكل موزّع يفرض على الحساسات المساهمة تشغيل الشبكة وإدارتها بالإضافة إلى نقل البيانات، وهذا يتضمن معالجة للمعلومات التحكم الخاصة بالشبكة، واتخاذ قرارات بناءً على هذه المعالجة، يمكن توسيع هذه المهمة لتتضمن معالجة البيانات التي تقوم الحساسات بنقلها عبر الشبكة، والتي يصطلح على تسميتها بالمعالجة ضمن الشبكة، حيث تعتبر من أهم القواعد التصميمية لشبكات الحساسات. تتضمن المعالجة ضمن الشبكة عدة تقنيات ومنها:

٢-٢-٢-١ المراكمة أو التجميع: Aggregation

بما أنّ كلفة نقل البيانات عبر الشبكة أكبر بكثير من كلفة معالجة هذه البيانات من حيث استهلاك الطاقة، فإنّ تجميع البيانات من قبل العقد قبل الإرسال إلى المصرف تعتبر من التقنيات التي تساهم في تقليل استهلاك الطاقة في هذه الشبكات.

في حال كان المصرف مهتم بالحصول على معلومات دورية عن متوسط درجة الحرارة أو الحرارة العظمى والدنيا، فمن الطبيعي أن لا يتم إرسال قراءات جميع الحساسات إلى المصرف، وإنما إرسال فقط المعلومة المطلوبة سواءً متوسط درجة الحرارة أو الدرجة العظمى أو الصغرى.

يقصد بتجميع البيانات أن العقد الوسيطة بين مصدر البيانات (والتي تعتبر هي أيضاً مصدراً للبيانات)، تقوم بتوليد بيانات جديدة مكوّنة من المعلومات القادمة من الحساسات الأخرى ومعلومات العقدة الحالية، تمتاز هذه البيانات بأنها صيغة شاملة و مركّزة من البيانات الأصلية [71].

إن نقل البيانات المجموعة من الوسط إلى طرف الشبكة (Network edge)-حيث يتم معالجتها- وبدون أي معالجة ضمن الشبكة يحد بشكل كبير من قابلية الشبكة للتوسع بسبب استنفاده لعرض الحزمة المتاح للاتصال، لذلك قام كل من Gupta & Kumar بتحديد السعة اللاسلكية (Wireless capacity) للبيانات التي من الممكن نقلها عبر الشبكة و حجم البيانات التي من الممكن لكل عقدة أن تنتجها(Node throughput) والتي تعطى بالعلاقة [17]:

$$Per\ Node\ Throughput = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.1)$$

حيث N هو عدد العقد في الشبكة اللاسلكية، وهذا يعني أن حجم البيانات التي من الممكن لكل عقدة أن تنتجها يسعى للصفر عندما يسعى عدد العقد إلى اللانهاية، بالإضافة إلى أن العقد تبدد معظم وقت عملها في إرسال (Forward) الرزم الخاصة بالعقد الأخرى، ولتجاوز هذا القيد تقوم العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية بعمليات تجميع وضغط للبيانات المكرّرة الناتجة عن تداخل حقول الاستشعار للحساسات المتجاورة وذلك قبل أن يتم إرسالها إلى المصرف عبر الشبكة. وقد بيّنت دراسة أن حجم البيانات التي لا

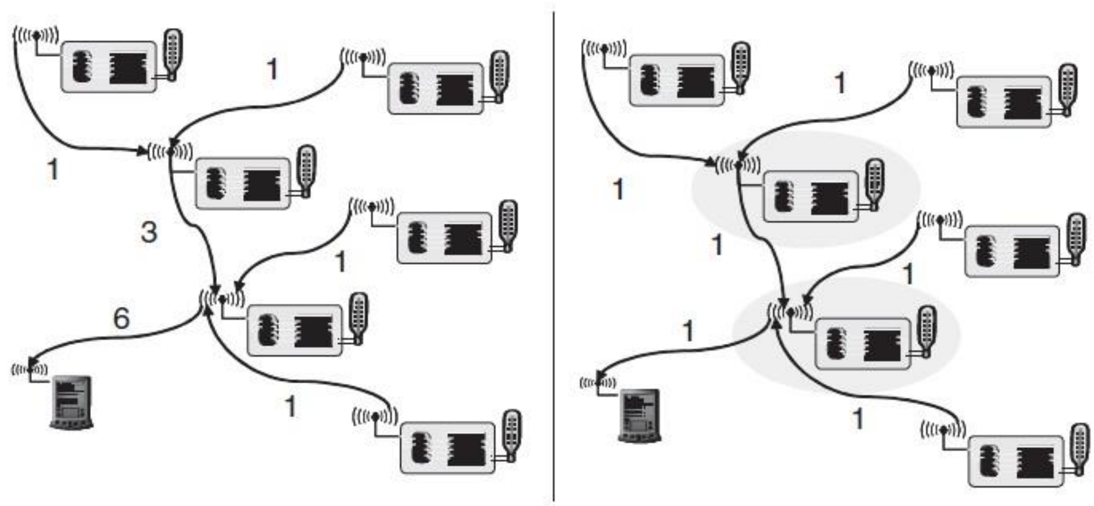
تحتوي تكرار و المولّدة من قبل شبكة تراقب ظاهرة فيزيائية ما هي من مرتبة $O(\log(N))$، حيث N عدد العقد في الشبكة [18]، وبالتالي فإن حجم البيانات المولّدة من كل عقدة هي من مرتبة $O(\frac{\log(N)}{N})$.

$$\lim_{n\to\infty}\frac{\log N}{N}=0 \xrightarrow{yields} O\left(\frac{\log N}{N}\right)=O(N)\ (2.2)$$

$$\lim_{n\to\infty}\left(\frac{1/\sqrt{N}}{N}\right)=0 \xrightarrow{yields} O\left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)=O(N)\ (2.3)$$

وحسب العلاقتين (2.2) و (2.3) نجد أن حجم البيانات المولّدة من كل عقدة هو ضمن حد حجم البيانات التي يمكن لكل عقدة أن تنقلها و الذي عرّفه Gupta & Kumar .

يوضّح الشكل (١.٢) فكرة هذه التقنية، في القسم اليساري، عدد من الحساسات التي ترسل قراءاتها إلى المصرف باستخدام اتصال لاسلكي متعدد القفزات، نحتاج إلى ١٣ رسالة لإرسال قراءات جميع العقد إلى المصرف (الرقم على الرابط يمثّل عدد الرسائل التي تمر عبر الرابط)، وفي حال قيام الحساسات المظلّلة بعملية التجميع، نحتاج فقط إلى إرسال ٦ رسائل.



شكل(١.٢) تجميع البيانات

٢-٢-٢-٢ الضغط والترميز الموزّع: Distributed source coding &compression

يهدف التجميع لتكثيف أو إيجاز البيانات القادمة من الوسط، وإهمال البيانات المكررة، وذلك بهدف تجنب نقل البيانات القادمة من كل الحساسات إلى المصرف. السؤال المطروح هو هل من الممكن تقليل

حجم البيانات الواجب نقلها إلى المصرف مع تمكينه من معرفة كل المعلومات عن قراءات الحساسات؟ إنّ الإجابة على هذا السؤال مرتبطة بمسائل الترميز الضغط المعروفة في الشبكات التقليدية، حيث تم تطوير العديد من التقنيات لترميز وضغط البيانات [18]، تهدف لتقليل عرض الحزمة اللازم لنقل هذه البيانات، لكن في شبكات الحساسات اللاسلكية تصبح المشكلة أعقد، حيث نحتاج لترميز بيانات قادمة من عدة مصادر وليس من مصدر وحيد (كما في حالة نقل الصوت والصورة من كاميرا وحيدة عبر الشبكة..)، بالإضافة إلى أن تقنيات الترميز التقليدية تتطلب قدرات معالجة غير متوفرة في الحساسات.

من الطبيعي أن تكون قراءات الحساسات المتجاورة في الوسط مترابطة، وبالتالي يمكن الاستفادة من هذا الترابط في البيانات لترميز البيانات والتقليل من حجمها. ومن الأعمال المنجزة في هذا المجال ما قام به Wolf & Slepian، حيث قدما نظرية تحمل اسميهما لكشف الترابط المكاني (Spatial correlation) و الزماني (Temporal correlation) في قراءات الحساسات [13].

٢-٢-٢-٣ الرماز المتنقّل والتشبيك المعتمد على الوكيل: Mobile code & agent based networking

توجد العديد من النماذج البرمجية القادرة على استثمار إمكانية تنفيذ البرمجيات ضمن الشبكة، ومن هذه النماذج الرماز المتحرّك (mobile code) و التشبيك المعتمد على الوكيل (agent based networking). يعتمد هذان النموذجان على رماز برنامج بحجم صغير يمكن نقله من عقدة لأخرى، وتنفيذه في كل عقدة (كقراءة درجة الحرارة في الحساس الحالي)، ومن ثم يتخذ هذا الرماز قراراً لتحديد العقدة التالية التي سيتوجه إليها. يمكن استخدام هذه النماذج في شبكات الحساسات لجمع البيانات التي يحتاجها المصرف من الحساسات.

٢-٢-٣ مركزية البيانات: Data centricity

تتمثل مركزية البيانات بما يلي:

٢-٢-٣-١ عنونة البيانات وليس العقد:

تهتم شبكات الاتصال التقليدية بطرفي الاتصال المرسل والمستقبل، أما تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية فلا تهتم بهوية العقد، وإنما تهتم بالمعلومات التي تجمعها من الوسط. إن التركيز على البيانات وليس على هوية العقد يسمّى التشبيك مركزي البيانات (Data centric networking). في هذه الحالة يتوجّب على الشبكة تأمين واجهة للتطبيق تتيح من خلالها عنونة البيانات المطلوبة وليس العقد، يتم تحديد مجموعة العقد المشمولة في العنونة مركزية البيانات بشكل ضمني عن طريق الخصائص التي تساهم فيها هذه العقد بالبيانات المطلوبة، ولتوضيح ذلك نأخذ مثال تتبع حركة كائن ما ضمن بيئته الطبيعية، في هذا المثال يطلب التطبيق إبلاغه عن وقوع حدث محدّد، وهو وجود الكائن في منطقة ما، جميع العقد التي اكتشفت وقوع هذا الحدث يتم إبلاغها بشكل ضمني عن هذا الطلب من قبل المصرف، فتقدّم التقارير عن هذا الحدث للمصرف.

يمكن الاستعانة بمعلومات مواقع العقد كإحدى الخصائص التي تحدد فيما اذا كانت العقدة مضمّنة بالطلب الخاص بالمصرف، كما في حالة التطبيق الذي يراقب متوسط درجة الحرارة في منطقة ما، فموقع المنطقة هو الذي يحدد العقد التي يتم إبلاغها ضمناً بنوع المعلومات التي يحتاجها المصرف.

يؤمّن التشبيك مركزي البيانات العديد من الميزات التي تتناسب مع طبيعة شبكات الحساسات اللاسلكية، فهو يدعم تقنيات المعالجة ضمن الشبكة مثل تجميع البيانات، بالإضافة للاستغناء عن أنماط العلاقات التقليدية بين المرسل والمستقبل (many to many, one to many, one to one, many to one) حيث أن العقد المساهمة في عملية الاتصال يتم تحديدها ضمناً بحسب قدرتها على تأمين البيانات التي يحتاجها المصرف، ويدعم فك الارتباط الزمني بين طلب البيانات والإجابة، حيث أن طلب البيانات من قبل المصرف لا يفرض أن تتم الإجابة خلال فترة زمنية محددة، وتعتبر هذه الميزة مناسبة لتطبيقات كشف الأحداث في

شبكات الحساسات، من مميزات هذا النموذج عدم الحاجة لعنونة كل حساس من حساسات بشكل مستقل (كعنوان IP في الشبكات التقليدية) والذي من شأنه توفير في استهلاك الموارد اللازمة لإدارة هذه العنونة.

ومن الطرق المعتمدة لتحقيق التشبيك مركزي البيانات:

٢-٢-٣-٢ النشر والاشتراك Publish/ subscribe

تستخدم هذه التقنية لتوصيف نوع البيانات التي يحتاجها المصرف بغض النظر عن العقد التي تساهم بتوفير هذه البيانات [14]، حيث أن العقدة التي تحتاج لنوع معيّن من البيانات تقوم بالاشتراك بهذا النوع، وكل عقدة من عقد الشبكة قادرة على نشر البيانات مع المعلومات عن هذه البيانات (Meta data). عند نشر بيانات جديدة من نوع ما يتم ابلاغ كل العقد المشتركة بهذا النوع عن البيانات الجديدة، ويمكن للعقد أن تقوم بإلغاء اشتراكها بأي نوع من البيانات وذلك حسب حاجتها وبالتالي لا تحصل على إشعارات بالبيانات الجديدة. يمكن أن تحدث عملية الاشتراك والنشر في أي لحظة زمنية وبدون الحاجة لمعرفة العقد التي قامت بهذه العمليات.

يمكن تحقيق هذا المفهوم المجرّد بالنشر والاشتراك بعدة طرق منها الاعتماد على كيان مركزي يقوم بإدارة عمليات النشر والاشتراك وإعلام المشتركين بالمعلومات الجديدة، لكن هذه الطريقة غير ملائمة لطبيعة شبكات الحساسات اللاسلكية. الطريقة الملائمة لطبيعة شبكات الحساسات اللاسلكية هي الطريقة الموزّعة، والتي تعتبر أكثر تعقيداً من الحل المركزي.

من التحديات المرتبطة بهذه التقنية آلية توصيف البيانات، إحدى الحلول المقترحة استخدام كلمات مفتاحيه أو موضوع (Key words, subject)، يتم تعريفها بشكل مسبق، وعند نشر البيانات يتم اعتماد هذه المواضيع أو الكلمات المفتاحيه للربط بين العقد التي تقوم بالنشر والعقد التي اشتركت بهذه المواضيع، يمكن توسيع هذه الطريقة لتصبح ذات بنية هرمية، حيث يتم تنظيم المواضيع أو الكلمات المفتاحية ضمن بنية شجرية، والاشتراك بأي موضوع يعني ضمناً الاشتراك بالمواضيع الأبناء له ضمن الشجرة.

٢-٢-٤ الاتصالات اللاسلكية متعددة القفزات: Multi-hope wireless connection

إن الاتصال اللاسلكي (باستخدام الأمواج الراديوية RF) متعدد القفزات يوّفر من استخدام الطاقة بالمقارنة مع الاتصال اللاسلكي بقفزة وحيدة ولنفس المسافة [15]، وذلك بسبب طبيعة الإشارة الراديوية وما

تتعرض له من خفوت ضمن وسط الإرسال، ولتوضح ذلك، بفرض أننا نريد إرسال خانة واحدة من النقطة v_i إلى النقطة v_j، المسافة الكلية بين النقطتين هي N_r، مسافة القفزة الواحدة هي r حيث $N_r = n\,r$ ، n عدد القفزات .الحد الأدنى للطاقة الواجب استقبالها لضمان قيمة محددة لخطأ الإرسال هو P_{rec}، الطاقة في طرف الإرسال P_{snd}، الخفوت الذي تتعرض له الإشارة الراديوية بالقرب من سطح الأرض يعطى بالعلاقة:

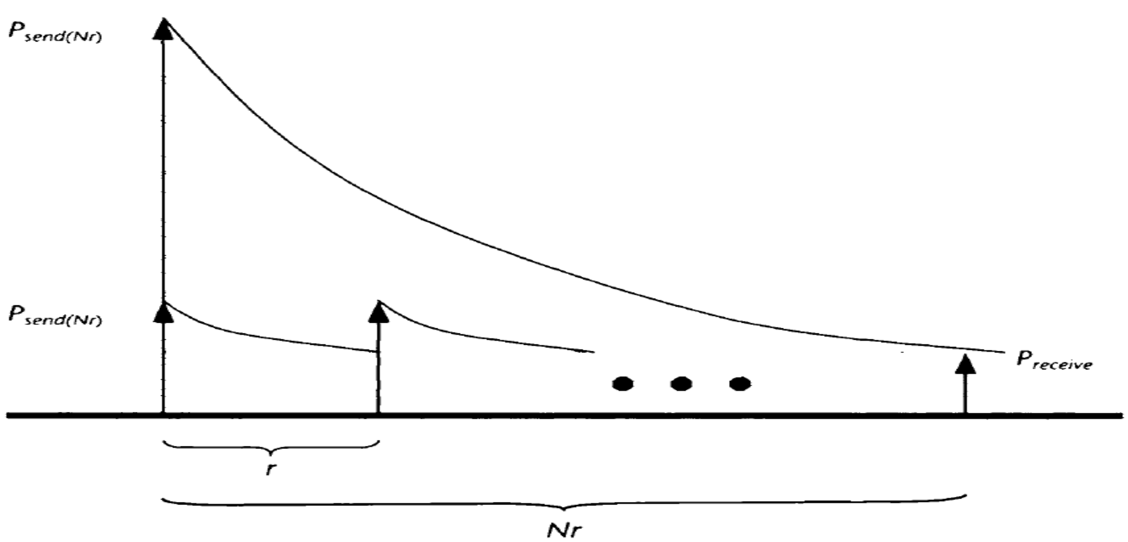
$$P_{rec} \sim \frac{P_{snd}}{r^{\propto}} \quad (2.4)$$

حيث r هي مسافة الإرسال، و $\propto$ هو معامل الخفوت الخاص بالموجة الراديوية، الناتج عن عوامل التداخل التي تتعرض لها الإشارة (تتراوح قيمته من ٢ إلى ٥) [15]، وبالتالي:

$$P_{snd} \sim r^{\propto} P_{rec} \quad (2.5)$$

نسبة الطاقة اللازمة للإرسال عبر قفزة وحيدة بالنسبة للطاقة اللازمة للإرسال عبر عدة قفزات هي :

$$\beta = \frac{P_{snd\,(N_r)}}{N\,P_{snd(r)}} = \frac{(N_r)^{\propto} P_{rec}}{N\,r^{\propto} P_{rec}} = N^{\propto -1} : \propto > 1, N > 1 \quad (2.6)$$

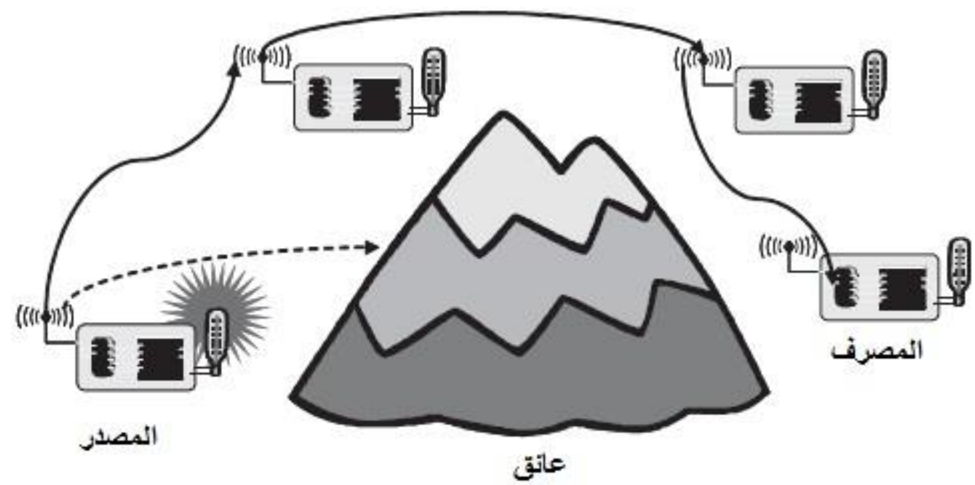


شكل (٢.٢) الخفوت الذي تتعرض له الإشارة الراديوية في حالتي قفزة وحيدة وعدة قفزات

يوضح الشكل (٢.٢) الخفوت الذي تتعرض له الإشارة الراديوية في حالتي قفزة واحدة وعدّة قفزات، نلاحظ من الشكل(٢.٢) و العلاقة (2.6) أنه كلما زادت قيمة N (عدد القفزات) كلما أدى ذلك إلى توفير أكبر في

كمية الطاقة المستهلكة، مع ملاحظة أن التحليل السابق يتجاهل استهلاك الطاقة من قبل المكونات الأخرى الخاصة بدارة إرسال/استقبال الأمواج الراديوية.

تجدر الإشارة إلى أن استخدام عدد أكبر من العقد من شأنه زيادة الكلفة المادية وزيادة الطاقة المستهلكة في مكونات دارات الإرسال/استقبال، وبالتالي فإن التصميم الأمثل يجب أن يوجد توازن بين استهلاك الطاقة والكلفة المادية، بالإضافة للاستفادة من الاتصالات متعددة القفزات في تجاوز العوائق، كما يوضح الشكل (٣.٢).



الاتصال متعدد القفزات لتجاوز العوائق شكل(٣.٢)

٢-٢-٥ التهيئة التلقائية: Self-Organization

هي قدرة الحساسات على ضبط معاملات التشغيل الخاصة بها بشكل مستقل بالإضافة للقدرة على التعامل مع دخول وخروج عقد من الشبكة، فعلى سبيل المثال يجب أن تكون كل عقدة في الشبكة قادرة على تحديد موقعها ومعرفة العقد المجاورة لها [73] .

٢-٢-٦ المحليّة: Locality

إن الالتزام بمبدأ العمليات المحلية في شبكات الحساسات اللاسلكية يضمن قابلية توسع هذه الشبكات وعملها بعدد كبير من العقد دون الحاجة لقدرات معالجة عالية للحساسات، حيث يحدّ من كميات البيانات

التي تخزنها الحساسات عن الحالة (State) أثناء القيام بمهام البروتوكولات، كون هذه البيانات تشمل بيانات العقد المجاورة بشكل مباشر.

٢-٣ أنواع تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية:

تشترك تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية ببعض الخصائص، فمعظم هذه التطبيقات تفّرق بشكل واضح بين مصدر البيانات (Source) وهي العقد التي تستشعر الوسط، والمصارف (Sinks) وهي العقد الواجب إيصال البيانات إليها. بعض التطبيقات تطلب أن تكون المصارف جزء من الشبكة كما في حالة مراقبة مريض، وبعضها الآخر تكون المصارف عبارة عن أنظمة خارج الشبكة كما في حالة المساعدات الرقمية الشخصية (PDA) لرجال الإطفاء، وفي معظم هذه التطبيقات يكون عدد المصادر أكبر بكثير من عدد المصارف، بالإضافة لأن المصارف لا تهتم بهوية العقد التي قامت بتوليد البيانات وإنما تهتم بالبيانات بحد ذاتها. يمكن تمييز عدة أنواع لطرق التواصل بين المصارف والمصادر في هذه الشبكات وهي:

١. **كشف وقوع حدث:**

تقوم الحساسات بإبلاغ المصرف عن وقوع حدث ما حال وقوعه، يمكن أن يقوم حساس وحيد بعملية الكشف عن هذا الحدث (تجاوز درجة الحرارة للحد المسموح)، وبعض الأحداث تتطلب اشتراك أكثر من حساس في عملية الكشف (ارتفاع درجة الحرارة بشكل سريع جداً...). وفي حال متابعة الشبكة لأكثر من حدث لا بد من إيجاد آلية لتصنيف هذه الأحداث وتمييزها عن بعضها البعض.

٢. **القياسات الدورية:**

يتوجب على الحساسات القيام بقياسات دورية للقيم قيد الدراسة في الوسط المحيط، خلال فواصل زمنية تحددها متطلبات التطبيق.

٣. **ملاحقة الأهداف:**

تقوم الحساسات بمهمتين، كشف دخول الأهداف لمنطقة المراقبة ومتابعة حركته ضمن هذه المنطقة وتزويد المصارف بهذه المعلومات، و تتطلب هذه المهمة التعاون بين الحساسات.

تتمايز تطبيقات الشبكات في الطريقة التي تفرضها لنشر العقد ضمن الوسط، فمنها ما يتطلب وضع هذه الحساسات بشكل مخطط ومدروس ضمن الوسط (المباني الذكية)، ومنها يعتمد على نشر هذه الحساسات بشكل عشوائي ضمن الوسط (نشر الحساسات عن طريق طائرة لتغطية موقع الحرائق).

٢-٤ تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية:

ساهمت شبكات الحساسات اللاسلكية في إيجاد طيف واسع من التطبيقات، وذلك بسبب قدرتها على استشعار شروط الوسط المحيط وتزويد المشغلين بمعلومات دقيقة قادمة مباشرةً من الوسط عز الظواهر قيد الدراسة، حيث تتوفر حساسات قادرة على قياس درجة الحرارة ونسبة الرطوبة و مستوى الإضاءة و مستوى الضجيج ومقدار الضغط و الاهتزاز، بالإضافة لتوفر حساسات قادرة على قياس نسبة المواد الكيمائية كالغاز المنزلي، وقياس الضغط الميكانيكي.... بالإضافة إلى إمكانية ربط الحساسات مع المشغلات الميكانيكية (Actuators) والذي يمّكن هذه الشبكات من الاستجابة لأحداث معينة قد تقع في الوسط إضافة لمراقبة هذا الوسط. ومن الأمثلة على تطبيقات هذه الشبكات :

١. تطبيقات الإغاثة: Disaster relief application

تعتبر من أهم تطبيقات هذه الشبكات كما في حالة حرائق الغابات، حيث تزود عقد الشبكة بحساسات قادرة على قياس درجة الحرارة مع إمكانية تحديد هذه العقد لموقعها بالنسبة لباقي العقد، ويتم نشر هذه الحساسات في منطقة الحريق (باستخدام طائرة مثلاً)، فتؤمن الشبكة معلومات عن درجات الحرارة في مختلف مناطق الحريق وهذا من شأنه أن يساعد في خلق تصور عن حدود المنطقة التي يمكن لرجال الإطفاء أو الآليات التدخل فيها، مع تزويدهم بمعلومات دقيقة عن جهات انتشار الحريق لضمان سلامتهم. ويمكن تعميم هذا المثال على حالات انتشار مواد كيماوية سامة أو غيرها من الكوارث الطارئة. في هذا النوع من التطبيقات يجب الأخذ بعين الاعتبار كلفة الحساسات منخفضة كونها تستعمل لمرة واحدة فقط ولفترة زمنية قصيرة نسبياً.

٢. مراقبة البيئة ووضع خرائط للتنوع الحيوي: Environment control and biodiversity mapping

يمكن أن تستخدم هذه الشبكات في مراقبة البيئة الطبيعية ومعرفة أنواع الكائنات الحية التي تعيش ضمن هذه البيئة[14]، حيث يتطلب هذا النوع من التطبيقات أن تكون فترة حياة الشبكة طويلة، وأن تكون قادرة على العمل بشكل ذاتي أو مستقل بالإضافة لوجوب أن تكون الحساسات بحجوم صغيرة غير ملحوظة ولا تسبب أي إزعاج للكائنات ضمن بيئتها. تحتاج هذه التطبيقات لعدد كبير من الحساسات الواجب نشرها في الوسط.

٣. المباني الذكية: Intelligent building

تستهلك المباني كميات كبيرة من الطاقة نتيجة أنظمة التكييف والتهوية والترطيب(Humidity Ventilation, Air Conditioning)، يمكن الاعتماد على شبكات الحساسات اللاسلكية في تأمين مراقبة بالزمن الحقيقي عالية الدقة لشروط هذه المباني (درجة الحرارة، تدفق الهواء، الرطوبة)، والذي من شأنه تحسين درجة الرضا لدى المقيمين في هذه المباني وتقليل استهلاك الطاقة [16]. هذا ويمكن استخدام هذه الحساسات لقياس الضغط الميكانيكي الذي تتعرض له المباني في المناطق الناشطة زلزالياً، والذي من شأنه أن يساعد في اتخاذ قرار سريع حول مدى صلاحية هذه المباني للسكن، ويمكن تعميم هذا المثال على المنشآت الحيوية كالجسور والسدود.

يمكن إضافة الحساسات للمباني أثناء عمليات الإنشاء أو بعد عملية الإنشاء، وفي حال كانت هذه الحساسات لا تملك تغذية كهربائية فإنها يجب أن تتمتع بفترة حياة طويلة تمتد لعشرات السنين، وبالمقابل فإن عدد الحساسات اللازمة لهذه التطبيقات صغير نسبياً وكلفتها صغيرة أمام كلفة البناء الكلية.

٤. إدارة المنشآت: Facility management

تمتاز المنشآت بامتدادها على مساحات واسعة، ويمكن استخدام شبكات الحساسات اللاسلكية للمساعدة في إدارة هذه المنشآت عن طريق إدارة عمليات الدخول والخروج من المنشأة للأفراد والآليات بعد تزويدهم بأجهزة تثبت هويتهم (badges) قادرة على التواصل مع هذه الشبكات،

مما يسهل عمليات ضبط الوصول إلى قطاعات المنشأة بناء على السماحيات المعطاة للأشخاص والآليات،يمكن توسيع هذا النوع من التطبيقات ليشمل الكشف عن محاولات الاختراق لهذه المنشأة (كحركة سيارة ضمن المنشأة خارج أوقات الدوام الرسمي) وتنبيه قسم الأمن لهذه الخروقات الأمنية. يتضمن هذا النوع من التطبيقات عدة تحديات منها الحاجة إلى عدد كبير من الحساسات، و أن تكون الحساسات قادرة على التعاون فيما بينها(لمتابعة حركة هدف ما..) بالإضافة لقدرة هذه الحساسات على العمل لفترات طويلة بالاعتماد على المدخرات.

٥. التطبيقات الزراعية: Agriculture applications

تستخدم هذه الشبكات للمساعدة في تحسين الإنتاج الزراعي عن طريق تقدير الكميات اللازمة من المياه والأسمدة للمزروعات من خلال غرس الحساسات ضمن التربة لمراقبة الرطوبة ونسب المواد العضوية ضمنها. تحتاج هذه التطبيقات لعدد قليل نسبياً من الحساسات لأداء هذه المهمة (حساس لكل ١ دونم)، يمكن الاستفادة من الحساسات في مراقبة المحاصيل مما يساعد في مكافحة الأوبئة. بالإضافة لما سبق يمكن الاستفادة من الحساسات في تربية الماشية عن طريق تزويد المواشي بحساسات تراقب المؤشرات الحيوية لها وإبلاغ المسؤولين في حال تجاوز هذه المؤشرات لقيمها الطبيعية.

٦. التطبيقات الطبية:Medical application

تقوم الحساسات بمراقبة وأخذ قيم عدد من المؤشرات الحيوية كالضغط الشرياني وسكر الدم للأشخاص الذين يحتاجون رعاية صحية (سواء كانوا متواجدين في مراكز الرعاية الصحية أو يمارسون حياتهم الطبيعية)، ومن ثم يتم تسجيل هذه البيانات بشكل آني في سجلات المراكز الصحية، وهذا من شأنه رفع مستوى الرعاية الصحية للأفراد، بالإضافة إلى تأمين قاعدة بيانات للمعلومات الطبية للأفراد تتصف بالشمول والدقّة ومحدّثة بشكل آني. يمكن استخدامها لتقديم دراسات دقيقة عن الواقع الصحّي والأمراض السارية في المجتمع، بالإضافة لإمكانية تقييم أداء طرق العلاج المتبعة.

٧. مراقبة الطرق السريعة والعامة وإدارة حركة المرور:

Monitoring highways and traffic management

تقوم الحساسات بتجميع بيانات تتعلق بعدد المركبات وسرعة حركتها، تستخدم للتقليل من الاختناقات المرورية ومعرفة الزمن اللازم لاجتياز هذه الطرقات، بالإضافة لتحسين السلامة العامة على هذه الطرقات[17].

٨. التطبيقات العسكرية: Military application

تقوم الحساسات بتجميع معلومات من أرض المعركة حول عدد الجنود والمركبات وتساعد في تحديد الأهداف ومتابعتها، بالإضافة لاستخدامها لمراقبة الحدود لكشف عمليات التسلل.

١٠. التطبيقات الهندسية: Engineering application

يمكن أن يتم تزويد المنشآت والآليات بعدد من الحساسات القادرة على تأمين معلومات آنية حول أوضاع هذه المنشآت أو الآليات والمساعدة في تحديد الصيانة اللازمة لها.

١٠. حماية البنية التحتية كشبكات المياه والطاقة والمياه :

عن طريق كشف الأحداث الغير طبيعية التي تتعرض لها هذه البنية التحتية.

الفصل الثالث: تقنيات تحديد المواقع في شبكات الحساسات اللاسلكية

تتطلب العديد من تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية أن تدرك كل عقدة من عقد الشبكة الموقع الفيزيائي لها ضمن الوسط المحيط، فعلى سبيل المثال عندما يكون الهدف من الشبكة كشف وقوع حدث معيّن ضمن الوسط، فإن كشف وقوع الحدث فقط بدون معلومات عن مكان وقوعه لا يحقق الهدف المرجو من هذا النوع من الشبكات، ولذلك تكون عملية كشف الحدث مرفقةً مع معلومات عن موقع العقد التي اكتشفت وقوع هذا الحدث. تفرض معظم تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية كالمراقبة والمتابعة وكشف الأحداث أن يتم نشر الحساسات بشكل عشوائي ضمن الوسط، وبالتالي لا يمكن أن يتم إعداد موقع العقد بشكل يدوي، بالإضافة إلى أن تزويد كل عقدة من عقد الشبكة بمستقبل (GPS) غير مجدٍ لأسباب تتعلق بالكلفة المادية لهذه المستقبلات وعدم قدرتها على العمل إلا في حال توفر خط رؤية بين المرسل والمستقبل (Line of sight).

يقصد بتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية عملية تقدير وحساب موقع الحساسات في الشبكة [19]، يتم ذلك بالاعتماد على معالجة خاصة في طرف الاستقبال للإشارات اللاسلكية وذلك بهدف معرفة المدى (المسافة أو الزاوية) الذي يفصل المستقبل عن المرسل، أو حساب عدد القفزات التي تفصل المستقبل عن عقدة ما. يمكن تصنيف تقنيات تحديد الموقع حسب نوع القياسات إلى:

- تقنيات تعتمد على حساب المدى Range Based: يتم في هذه الطرق قياس المسافة أو الزاوية بين عقدتين متجاورتين، ومن التقنيات التي تندرج ضمن هذا النوع: زمن الوصول و الفرق في زمن الوصول و زاوية الوصول بالإضافة إلى مؤشر قوة الإشارة المستقبلة. تعتمد هذه التقنيات على تحليل صفحة الإشارة أو الوقت اللازم لانتشار الإشارة من المرسل إلى المستقبل للحصول على القياسات المطلوبة، من المساوئ التي تعاني منها هذه الطرق حاجتها لمتطلبات عتادية إضافية وبالتالي الكلفة الزائدة مادياً وزيادة استهلاك الطاقة بالإضافة لتأثرها بالضجيج.
- تقنيات لاتعتمد على حساب المدى Range Free: يهدف هذا النوع من الطرق إلى الاستقلال عن العتاد الصلب المستخدم من قبل العقد و تجاوز الأخطاء التي تعاني منها التقنيات التي تعتمد على المدى. تعتمد هذه التقنيات على معلومات الاتصال بين العقد وعدد القفزات بين العقد لتقدير المسافة بين هذه العقد، بالإضافة إلى الاعتماد على الخصائص المميزة للوسط الذي تم نشر العقد ضمنه مثل نمط انتشار الإشارة الراديوية خلاله.

تعتمد تقنيات تحديد الموقع على مدخلاتٍ محدّدةٍ من أجل تحديد مواقع العقد، ففي حال وجود عقد مرشدة ضمن الشبكة (Beacon وهي العقد التي تكون على معرفة مسبقة بموقعها ضمن نظام إحداثيات مطلق، ولها تسميات أخرى في الأبحاث مثل Anchor, Landmark) فإن مواقع هذه العقد هي جزء من الدخل الذي تعتمد عليه هذه التقنيات، أما الجزء الآخر من الدخل يتمثل بمعلومات الاتصال بين العقد (Connectivity Information) وذلك في حال كانت التقنية لا تعتمد على حساب المدى، أمّا إذا كانت التقنية تعتمد على حساب المدى فإن القسم الآخر من الدخل يكون المسافة أو الزوايا بين العقد، و يكون خرج هذه التقنيات عبارة عن مواقع العقد ضمن نظام إحداثيات يكون مطلقاً في حال احتواء الشبكة على عقد مرشدة، ونسبياً في حال عدم احتوائها الشبكة على عقد مرشدة.

يقدّم هذا الفصل عرضاً لعدد من التقنيات التي يمكن أن تستخدمها العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية لتقدير وحساب موقعها ضمن الوسط بشكل آلي وذلك من خلال الاعتماد على باقي مكونات شبكة الحساسات اللاسلكية، أو بالاعتماد على بنية تحتية خارجية [20].

٣-١ خصائص تحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية:

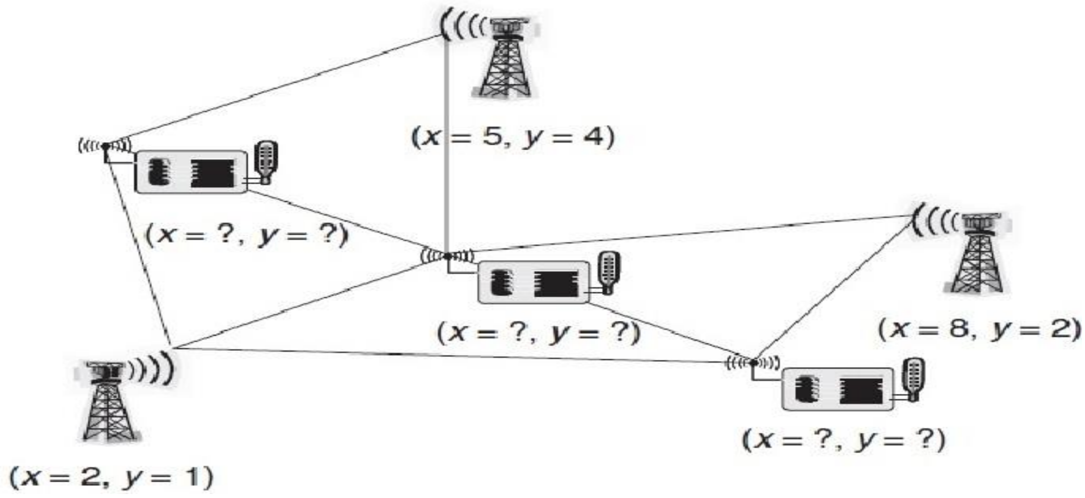
يمتلك نظام تحديد موقع العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية مجموعة من الخصائص التي يجب تصنيفها بغية توضيح الهدف النهائي المرجو من هذه العملية، وفيما يلي أهم هذه الخصائص:

- **الحسابات المحلية بالمقارنة مع الحسابات المركزية:** هل يقوم النظام بتنفيذ المعالجة اللازمة على القياسات التي تجريها العقد بشكل محلّي من قبل هذه العقد أم يتطلب إرسال هذه البيانات إلى محطة معالجة مركزية لتتم معالجتها لمعرفة مواقع العقد، ومن ثم توزيع هذه المعلومات على العقد المعنية، من الواضح أن الاستراتيجية التي يتبعها النظام لها أثر كبير في قابلية الشبكة للتوسع وضم عدد كبير من العقد، وذلك من خلال حجم الحمل الزائد الذي تسببه من حيث المعالجة على الشبكة، ويتوجب عدم إغفال الجانب الأمني، ففي حال المعالجة المركزية يظهر خطر انكشاف مواقع العقد لمكوّن وحيد ضمن الشبكة.
- **الدقّة والانضباط Accuracy and precision:** وهما أهم مقياسين لتقييم أداء نظام تحديد الموقع هما الدقّة وانضباط نتائج هذا النظام. يمكن تعريف الدقّة على أنها أطول مسافة بين الموقع الذي تم تقديره من قبل النظام وبين الموقع الحقيقي لأي عقدة وبالتالي فإن الدقّة العالية

تعني طولاً صغيراً لهذه المسافة. أما الانضباط فهو معدّل تحقيق الدقّة مأخوذ كمعدّل لعدد من محاولات تحديد موقع عقدة ما. فعلى سبيل المثال يمكن توصيف نظام بأنه يحقق دقة ٢٠ سم بانضباط ٩٥% على الأقل. تستخدم هذه الثنائية (الدقة/ الانضباط) للتمييز بين أنظمة تحديد المواقع ولا يمكن الاعتماد على قيمة مقياس واحد فقط للتمييز بين هذه الأنظمة [20].

- **نطاق العمل:** من الممكن أن يكون الهدف من نظام تحديد الموقع العمل ضمن نطاق ضيّق يشمل غرفةً أو بناءً أو نطاقاً واسعاً كالغابة، ونلاحظ مقياسين مهمين وهما المنطقة التي يستطيع النظام تغطيتها بوحدة بنية تحتية وحيدة خاصة بالنظام، وعدد العناصر التي يستطيع النظام تحديد موقعها باستخدام وحدة بنية تحتية وحيدة.
- **المحدودية والكلفة:** تمتلك أنظمة تحديد الموقع محدودية ضمنية للنشر، فعلى سبيل المثال لا يمكن أن يعمل نظام GPS ضمن الأبنية، بينما تعمل أنظمة أخرى فقط ضمن نطاق محدود و لا تستطيع تأمين تغطية شاملة، بالإضافة لذلك لدى أنظمة تحديد الموقع كلفة زمنية (الفترة الزمنية اللازمة لتنصيب البنية التحتية، والزمن اللازم للإدارة) وكلفة فراغية (حجم الأجهزة والحجم اللازم للبنية التحتية) بالإضافة لكلفة استهلاك الطاقة أثناء العمل و الكلفة المادية (سعر التجهيزات اللازمة) والحمل الزائد الذي سيولده النظام على الحركة ضمن الشبكة.
- **الموقع الفيزيائي مقابل الموقع الرمزي:** هل يقوم النظام بتوفير بيانات حول الموقع الفيزيائي للعقد ضمن نظام إحداثيات رقمي أم يقوم بتوفير معلومات حول الموقع الرمزي للعقدة، فعلى سبيل المثال يمكن أن يقدم النظام المعلومات التالية: تقع العقدة في المكتب رقم ٥٠ في البناء السادس (التي تمثل توصيفاً رمزياً لموقع العقدة) ، وهل يؤمن النظام آلية لتحويل بين الموقع الفيزيائي والموقع الرمزي للعقدة؟.
- **الإحداثيات المطلقة بالمقارنة مع الإحداثيات النسبية:** يصلح نظام الإحداثيات المطلق لمختلف الاستخدامات وعادةً ما يكون مضمّناً في إطار مرجعي، وكل نقطة تملك إحداثيات مميزة عن باقي النقاط، على الجانب الآخر في الإحداثيات النسبية تحصل كل عقدة على إحداثيات العقد الأخرى بالمقارنة مع موقعها الحالي بدون أي ارتباط مع إطار مرجعي ثابت.

يوضح الشكل (١.٣) تحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية، وذلك بمساعدة عقدتين مرشدتين.



شكل (١.٣) تحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية بالاعتماد على العقد المرشدة

٣-٢ الإشارة المستخدمة:

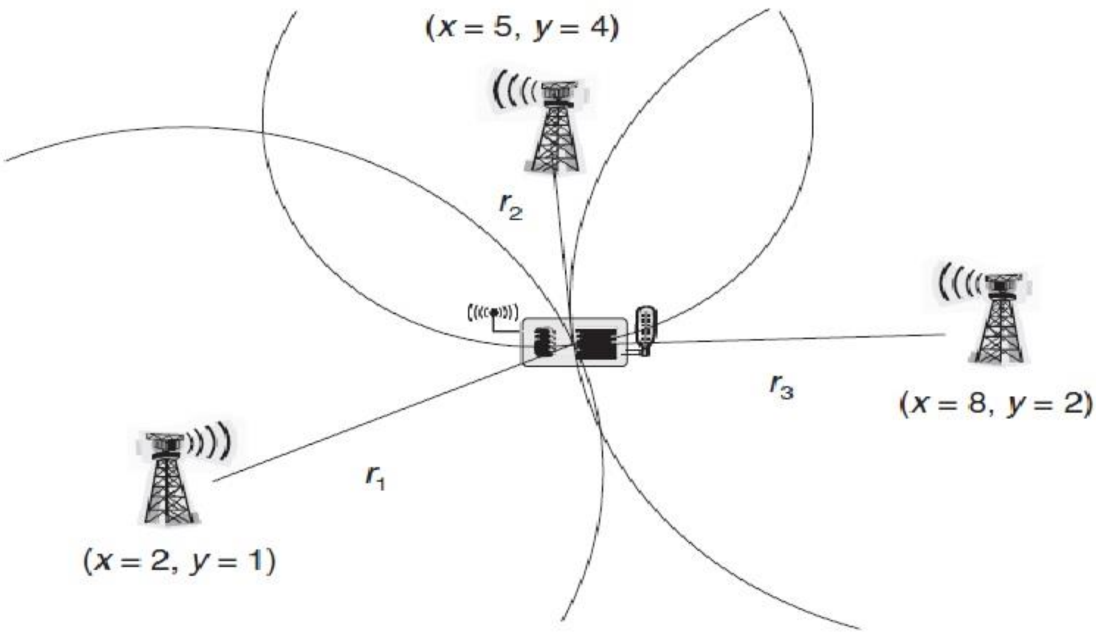
يؤثر نوع الإشارة المستخدمة في المرسل في دقة تقدير مواقع العقد، ولذلك يتوجب اختيار نوع إشارة يلائم نوع التطبيق وشروط البيئة. تؤثر شروط الوسط الذي سيتم نشر العقد ضمنه بشكل كبير في عملية تحديد الموقع، فعلى سبيل المثال في البيئة الرطبة يكون أداء الأمواج الصوتية أفضل من أداء الأمواج الراديوية وذلك كون الرطوبة تمتص وتعكس الأمواج الراديوية عالية التردد، في حين يكون لها أثر قليل في الأمواج الصوتية ذات الطبيعة الاهتزازية. يمكن أن يفرض التطبيق استخدام نمط معيّن للإشارة، ففي التطبيقات العسكرية يتوجب على العقد تحديد موقعها وبأقل قدر ممكن من الضجيج في الوسط حفاظاً على سريتها، وهذا ما يفرض اختيار أمواج راديوية بترددات تحقق هذه الميزة، وتعتبر أيضا الأشعة تحت الحمراء مناسبة لبعض التطبيقات.

٣-٣ طرق تحديد الموقع:

يمكن استخلاص معلومات حول العلاقة الهندسية بين مواقع العقد من خلال الاتصال القائم بين هذه العقد، فمن الممكن تقدير المسافة الفاصلة بين العقد بالإضافة إلى تقدير زاوية المثلث المشكّل من العقدة المجهولة الموقع والعقدتين المرشدتين، وباستخدام مبادئ الهندسة يمكن الاستفادة من هذه المعلومات لاستنتاج مواقع العقد مجهولة الموقع.

في حال الاعتماد على المسافة بين العقد فإن الطريقة تسمى Lateration أما في حال الاعتماد على الزوايا بين العقد فإن الطريقة تسمى Angulation.

في طريقة Lateration وفي الحالة المبسطة تتموضع العقدة ضمن مستوي ولديها قياس دقيق للمسافة التي تفصلها عن ثلاث عقد مرشدة لا تقع على استقامة واحدة (يمكن توسيع هذه الطريقة لتشمل فضاء بثلاثة أبعاد ولكن للتبسيط سنفرض أن العقدة موجودة في مستوي ، وفي حال تم توسيع الدراسة إلى فراغ ثلاثي الأبعاد فإن العقدة تحتاج لأربع عقد مرشدة مجاورة)، و بالاعتماد على هذه المسافات ومواقع العقد الثابتة فإن موقع العقدة يجب أن يكون في نقطة تقاطع ثلاث دوائر مركز كل منها إحدى العقد الثابتة.



شكل (٢.٣) طريقة Lateration لتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية

في الواقع، إن المسافة المقاسة بين العقدة مجهولة الموقع والعقد المرشدة ليست مثالية وبالتالي فإن التقاطع بين الدوائر الثلاث لن يكون نقطة وحيدة، ولتجنب هذه المشكلة يمكن الاعتماد على قياس مسافات أخرى بين العقدة وعقد مرشدة أخرى (مغايرة للثلاث الأولى) وهذا ما يسمى Multilateration والتي تعتبر تقنية أساسية ويتم استخدامها في الكثير من أنظمة تحديد الموقع.

طريقة أخرى وهي Angulation والتي تعتمد على حقيقة أنه في المثلث إذا علم طول ضلع وقياس زاويتين فإن موقع النقطة الثالثة هو نقطة تقاطع الضلعين الباقيين في المثلث وأيضاً في هذه الطريقة

تظهر مشكلة عدم دقة القياسات ويمكن تخطيها باستخدام قياسات متعددة والتي تسمى Multiangulation.

٣-٤ القياسات المستخدمة لتحديد الموقع:

- **قياس المسافة:**

لاستخدام تقنية Multilateration & Lateration يجب أن يتوفر لدينا تقدير للمسافة بين العقدة المراد تحديد موقعها والعقد المرشدة، ويمكن تأمين هذه المعلومة بالاعتماد على المكونات الموجودة في العقدة وخاصةً المرسل/المستقبل اللاسلكي.

تؤثر المسافة الفاصلة بين المرسل والمستقبل في خصائص الاتصال اللاسلكي بينهما، وبالتالي إذا استطاع المستقبل قياس هذه الخصائص فإنه يمكن الاستفادة منها في تقدير المسافة التي تفصل بين المرسل والمستقبل، ومن أهم الخصائص التي تتأثر بالمسافة بين المرسل والمستقبل:

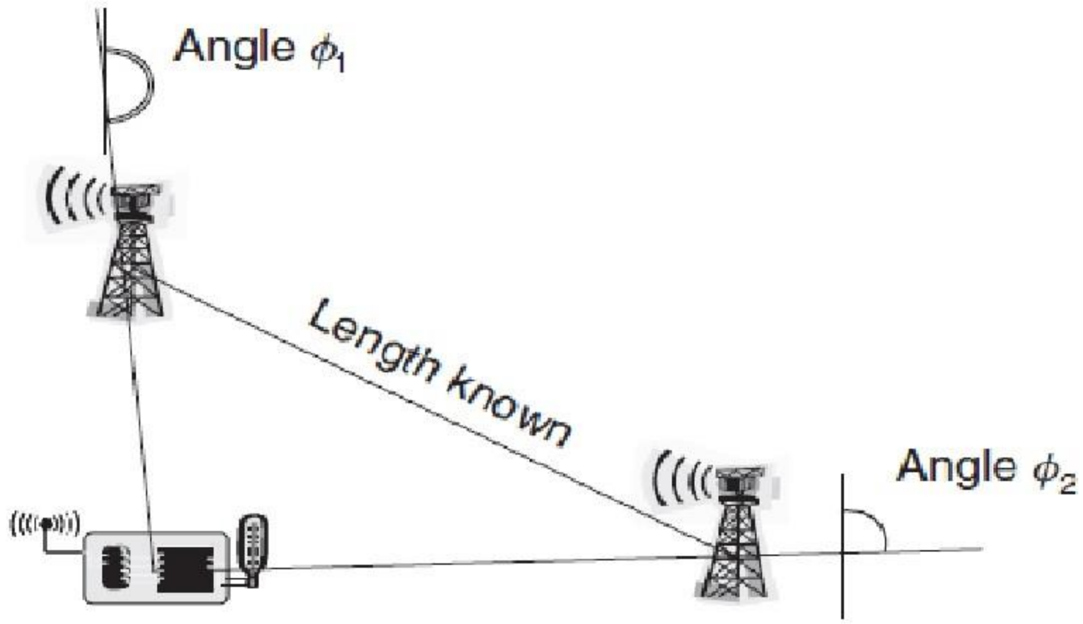
- مؤشر قوة الإشارة المستقبلة Received signal strength indicator
- زمن الوصول Time of arrival
- الفرق في زمن الوصول Time difference of arrival

- **قياس الزوايا:**

يمكن قياس الزوايا بين العقد وذلك كبديل لقياس المسافة فيما بينها، حيث يتم قياس الزاوية المحصورة بين العقدة المرشدة والعقدة المجهولة الموقع واتجاه مرجعي مثل الشمال المغناطيسي، أو الزاوية المشكلة بين عقدتين مرشدتين و العقدة المجهولة الموقع.

إحدى التقنيات المستخدمة لقياس الزوايا هي استخدام الهوائيات الموجهة التي ترسل وتستقبل فقط باتجاه محدد ولها القدرة على الحركة (نفس الآلية المتبعة في هوائيات الرادارات) وهذا ما يجعل عملية قياس الزوايا عملية سهلة، لكن يجب الانتباه إلى أن هذه التجهيزات ليست مناسبة للعقد التقليدية في شبكات الحساسات اللاسلكية وإنما مناسبة فقط للعقد المرشدة التي تشكل البنية التحتية التي تدعم هذه الشبكات. تقنية أخرى يتم فيها وضع عدة هوائيات على العقد مع فواصل معروفة بينها، ومن ثم قياس فرق الزمن بين وصول الإشارة إلى هذه الهوائيات، من خلال ذلك نستطيع إيجاد الاتجاه الذي قدمت منه الإشارة، لكن يجب الانتباه إلى أنه كلما قلّت الفوارق بين الهوائيات كلما زادت دقة التوقيت

المطلوبة وهذا بدوره يفرض قيوداً زمنية صعبة التحقيق وذلك باعتبار أن موارد العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية قليلة.



شكل (٣.٣) طريقة Angulation لتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية

٣-٤-١ مؤشر قوة الإشارة المستقبلة: Received signal strength indicator (RSSI)

بفرض أن الطاقة المستخدمة في الإرسال هي P_{Tx}، نموذج فقد الإشارة الخاص بالوسط معلوم ومعامل الفقد الخاص بالوسط (α) أيضاً معلوم، وبالتالي باستطاعة المستقبل استخدام قوة الإشارة المستقبلة P_{Rcvd} واستنتاج المسافة d بين المرسل والمستقبل من معادلة الفقد التالية:

$$P_{\mathrm{Rcvd}} = c\,\frac{P_{Tx}}{d^{\alpha}} \rightarrow \quad (3.1)$$

$$d = \sqrt[\alpha]{\frac{cP_{Tx}}{P_{Rcvd}}} \qquad (3.2)$$

حيث (c) هو عبارة عن ثابت خاص بالوسط.

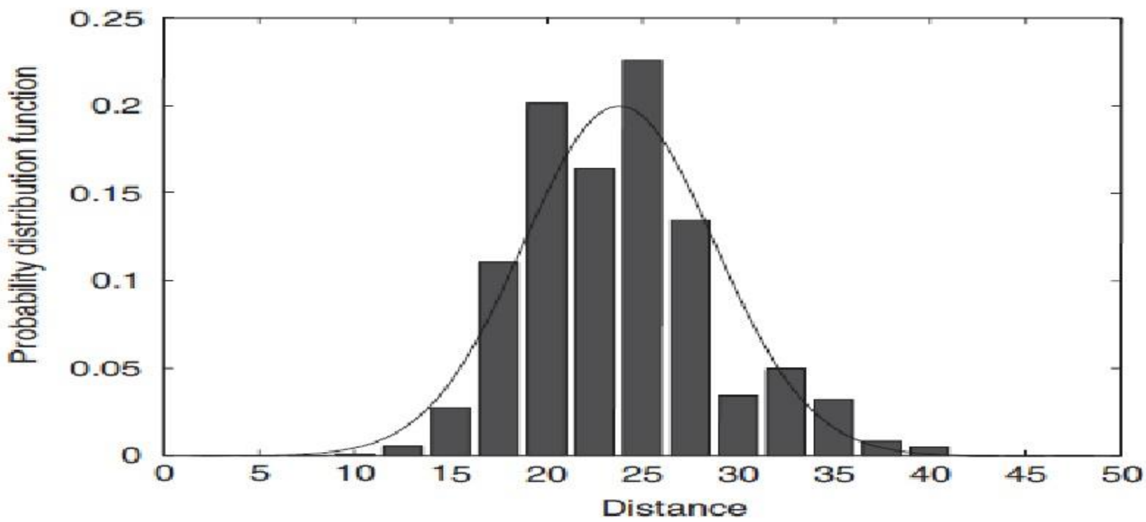
تعتبر هذه الطريقة جيدة كونه لا يوجد حاجة لإضافة أي تجهيزات عتادية أخرى، بالإضافة إلى أنها لا تسبب أي حمل زائد على الاتصال بين المرسل والمستقبل. لكن سيئة هذه الطريقة أن قيمة RSSI ليست ثابتة بل تتذبذب بشدة حتى لو كان كل من المرسل والمستقبل ثابتين بدون حركة، هذا التذبذب ناتج عن

عوامل مثل تغير شروط الوسط المحيط من درجة الحرارة والرطوبة، حيث بينت الدراسة [21] أن قيمة هذا التذبذب حوالي ٥٠% من قيمة RSSI.

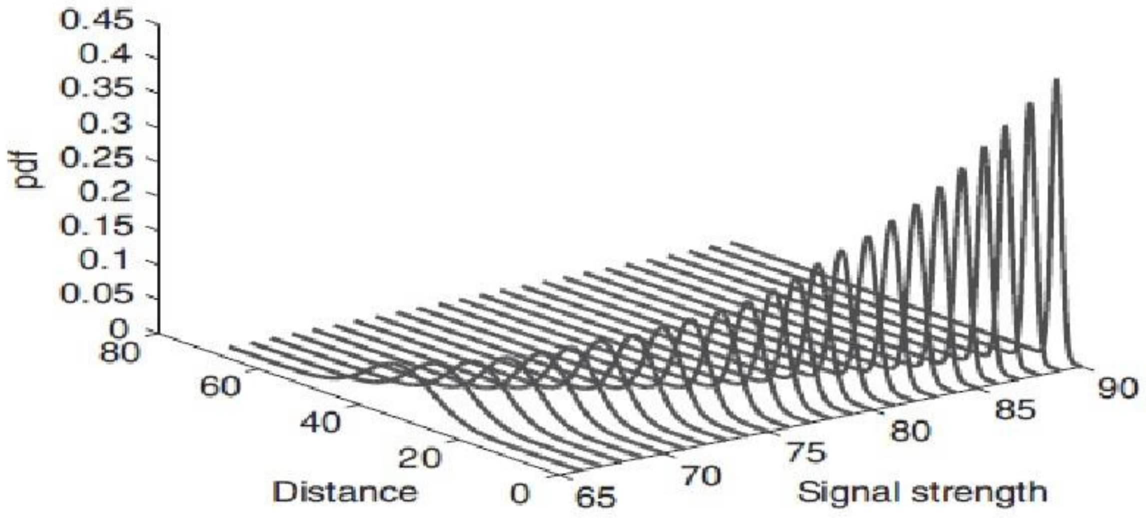
يمكن تجنب هذه المشكلة عن طريق تكرار عمليات القياس و فلترة القيم الشاذة باستخدام طرق إحصائية [22] والجدير بالذكر أن المستقبلات/المرسلات الراديوية البسيطة ذات الجودة المنخفضة لاتستطيع تحديد قيمة دقيقة لـ RSSI [23]، بالإضافة إلى أن هذه المرسلات/المستقبلات تقوم بعمليات إرسال باستخدام استطاعة مغايرة عن الاستطاعة المحددة ضمن مواصفاتها الفنية.

المشكلة الثالثة التي تعاني منها هذه الطريقة هي العوائق ضمن الوسط، والتي تعيق انتشار الإشارة بالإضافة لظهور أثر تعدد المسارات [24]. ينتج عن ذلك تعرض الإشارة لتخامد أكبر ناتج عن سلوكها الطريق غير المباشر بالمقارنة مع التخامد الذي تعاني منه عند سلوكها لطريق مباشر، والذي ينتج عنه تقدير خاطئ للمسافة بين المرسل والمستقبل. هذه المشكلة لا يمكن تجنبها باستخدام القياسات المتكررة.

قام كل من Ramadur Aj & Sichitiu [25] بدراسة تفصيلية لهذه الطريقة، وقد أظهرت الدراسة أن الربط بين قيم RSSI والمسافة بين هذه العقد هي بالحقيقة عبارة عن عملية عشوائية حيث قام الباحثان بتجميع قيم RSSI لعدد من المسافات وبشكل متكرر في بيئة اختبار خالية من العوائق، ومن ثم قاموا بحساب عدد المرات التي تقابل فيها كل مسافة من المسافات قيمة محدّدة لـ RSSI ومن ثم تم حساب الكثافة الخاصة بهذا المتحول العشوائي.



شكل (٤.٣) تابع الكثافة الاحتمالي للمسافة وذلك بالنسبة لقيمة محددة لـ RSSI



شكل (٥.٣) عدة توابع كثافة احتمالية للمسافة وذلك لقيم مختلفة لـ RSSI

من الشكل (٥.٣) نلاحظ أن مقدار المعلومات المقدمة من قبل قيم RSSI صغير في حال كانت المسافة بين المرسل والمستقبل كبيرة نسبياً على اعتبار أن الكثافة منشورة بشكل واسع وبالتالي عند استخدام RSSI كتقنية لحساب المسافة يتوجب علينا إدراك أن هناك هامشَ خطأٍ جديراً بالاهتمام في النتائج ويجب التعامل معه، أو اعتبار هذه النتائج عشوائية ومعالجتها من جديد.

٣-٤-٢ زمن الوصول: Time of arrival (ToA)

يعتمد زمن الوصول ToA (ويُعرَف أيضاً في بعض الدراسات بزمن الطيران Time of flight) على العلاقة بين المسافة المقطوعة من قبل الإشارة و زمن الإرسال وذلك عندما تكون سرعة انتشار الإشارة ضمن الوسط معلومة، على اعتبار أن كل من المرسل والمستقبل على علم بتوقيت بدء الإرسال. يقوم المستقبل بحساب الزمن اللازم لوصول الإشارة إليه من المرسل ومن ثم حساب المسافة التي تفصله عن المرسل، بدوره يقوم المستقبل بإعادة إرسال الإشارة المستقبلة إلى المرسل في توقيت محدد، يستخدمها المرسل لمعرفة الزمن اللازم لانتقال الإشارة منه إلى المستقبل ومن ثم بالاتجاه المعاكس وبالتالي يستطيع حساب المسافة التي تفصله عن المستقبل بالاعتماد على فرضية أن المسار متماثل في الاتجاهين.

تحتاج هذه الطريقة لتزامن دقيق بين المرسل والمستقبل وذلك حتى تعطي نتائج دقيقة، وهو أمر سهل التحقيق في الأمواج الصوتية ولكنه على العكس من ذلك في الأمواج الراديوية. من مساوئ هذه الطريقة أن سرعة انتشار الإشارة في الوسط تتعلق بخصائص هذا الوسط مثل درجة الحرارة والرطوبة وتتغير بتغير هذه الشروط.

٣-٤-٣ فرق توقيت الوصول: Time difference of arrival (TDoA)

تم تطوير هذه التقنية لتجنب الحاجة إلى آلية مستقلة لمزامنة الطرفين (المرسل والمستقبل)، حيث يتم الاعتماد على تزامن ضمني وذلك عن طريق تأمين المعلومات عن بداية الإرسال للطرف الآخر وذلك بشكل مباشر.

يمكن تحقيق ذلك عن طريق استخدام نوعين من الإشارة بسرعتي انتشار مختلفتين(على سبيل المثال أمواج راديوية تنتشر في الخلاء بسرعة الضوء والأمواج فوق الصوتية التي تنتشر في الخلاء بسرعة ٣٤٤ م/ثا في درجة حرارة٢١ سيليزيوس، سرعة الضوء ٢٩٩.٧٩٤.٤٥٨ م/ثا). يبدأ المرسل بإرسال الإشارتين فوق الصوتية و الراديوية بشكل متزامن، يستخدم المستقبل وصول الإشارة الراديوية لبدء قياس الزمن لحين وصول الإشارة فوق الصوتية، مع إهمال الزمن الذي استغرقته الإشارة الراديوية للانتشار في الوسط والوصول إلى المستقبل وبدون أن يؤثّر ذلك على النتائج.

السيئة الواضحة لهذه الطريقة هي حاجتها لنوعين من المرسلات/المستقبلات في كل عقدة من العقد، أما ايجابيتها تكمن في تأمينها دقة أفضل من طريقة RSSI، حيث أظهرت الأبحاث أن هذه الطريقة تستطيع تأمين دقة في الموقع مع هامش خطأ ضئيل يقدر بـ ٢ سم.

يوجد علاقة تبادلية واضحة بين الخطأ في تحديد المسافة والتعقيد والكلفة، حيث أن تقنية RSSI تعتبر أبسط طريقة وتعمل باستخدام العتاد الصلب الموجود في كل عقدة من العقد بشكل أساسي، في حين أن طريقة TDoA تؤمن دقة أفضل ولكنها تحتاج عتاداً صلباً ليضاف إلى العقد مما يرفع الكلفة والتعقيد ويزيد من استهلاك الطاقة. اختيار إحدى الطريقتين يعتمد على نوع التطبيق و سماحيته للأخطاء في الموقع، فإذا كان التطبيق حساساً جداً لأخطاء الموقع فلا يمكن تجنب الحمل الزائد الذي تسببه TDoA، أما إذا كان التطبيق متسامحاً مع هذا النوع من الأخطاء فيمكن الاعتماد على RSSI.

٣-٤-٤ الأساس الرياضي لتقنية Multilateration

تعتبر هذه التقنية الأكثر شيوعاً لتحديد الموقع في شبكات الحساسات اللاسلكية وتشكل اللبنة الأساسية لعدد من الطرق الأخرى التي سيتم التطرق لها لاحقاً في هذا الفصل، لذلك نناقش الأساس الرياضي لهذه التقنية، و تتم هذه المناقشة ضمن السياق التالي: ضمن مستوي يحتوي على ثلاث عقد ثابتة والمسافة بين العقد المرشدة والعقد مجهولة الموقع معلومة بدقة.

بفرض لدينا ثلاث نقط ثابتة معلومة الموقع ضمن إحداثيات مطلقة وهي $i = 1,2,3$ (x_i, y_i) وعقدة غير معلومة الموقع (x_x, y_x) والمسافة بين كل عقدة من العقد الثابتة والعقدة مجهولة الموقع معلومة بدقة وهي: $i = 1,2,3$ r_i وبالتالي يكون لدينا:

$$(x_1 - x_x)^2 + (y_1 - y_x)^2 = r_1^2 \quad (3.3)$$

$$(x_2 - x_x)^2 + (y_2 - y_x)^2 = r_2^2 \quad (3.4)$$

$$(x_3 - x_x)^2 + (y_3 - y_x)^2 = r_3^2 \quad (3.5)$$

ولحل جملة المعادلات السابقة يجب تحويلها إلى جملة معادلات خطية وذلك عن طريق إزالة المتحولات x_x^2, y_x^2، ويمكن تحقيق ذلك عن طريق طرح إحدى المعادلات من المعادلتين الباقيتين فنحصل على جملة معادلتين خطيتين بمتحولين قابلة للحل، بطرح (3.5) من (3.3) وطرح (3.5) من (3.4) نحصل على المعادلات:

$$(x_1 - x_x)^2 + (y_1 - y_x)^2 - (x_3 - x_x)^2 - (y_3 - y_x)^2 = r_1^2 - r_3^2 \quad (3.6)$$

$$(x_2 - x_x)^2 + (y_2 - y_x)^2 - (x_3 - x_x)^2 - (y_3 - y_x)^2 = r_2^2 - r_3^2 \quad (3.7)$$

وبالإصلاح تصبح المعادلات:

$$2(x_3 - x_1)x_x + 2(y_3 - y_1)y_x = (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (3.8)$$

$$2(x_3 - x_2)x_x + 2(y_3 - y_2)y_x = (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \quad (3.9)$$

يمكن كتابة المعادلتين (3.8) و (3.9) بشكل مصفوفات كالتالي:

$$2\begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_x \\ y_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

حيث المصفوفة اليسارية واليمينية تتكونان من قيم ثابتة، ولهذه المصفوفة حل وحيد.

تضمن هذه الطريقة الحصول على إحداثيات العقدة المجهولة وذلك إذا كانت المسافة بين العقدة مجهولة الموقع والعقد المرشدة معلومة وبشكل دقيق، ولكن في التطبيقات الفعلية هذه المسافة يتم تقديرها مع هامش خطأ متعلق بطريقة تقدير هذه المسافة (TDoA, ToA, RSSI) ولتجاوز هذه المشكلة يتم الاعتماد على أكثر من ثلاث عقد معلومة الموقع وبالتالي يصبح إيجاد موقع العقدة هو عبارة عن مسألة أمثلة (Optimization) الهدف منها تقليل مقدار الخطأ لأقصى حد ممكن وذلك باستخدام نموذج رياضي أكثر تعقيداً.

٣-٥ تحديد الموقع لقفزة واحدة: Single hope localization

بالاعتماد على آليات قياس المسافة والزاوية، تم تطوير عدد من أنظمة تحديد الموقع. نستعرض بعض هذه الأنظمة التي تم تطويرها للقيام بذلك بالنسبة لعقدة لديها اتصال مباشر بقفزة واحدة مع العقد المرشدة، أما القسم التالي يستعرض الحالة الأكثر شيوعاً في شبكات الحساسات اللاسلكية حيث تحتاج العقدة لأكثر من قفزة واحدة حتى تتصل مع العقد المرشدة. ظهرت أنظمة القفزة الواحدة قبل ظهور شبكات الحساسات اللاسلكية ومع ذلك فهي تشكل حجر الأساس الذي تم البناء عليه لتصميم أنظمة تحديد الموقع متعددة القفزات.

- **العلامات الفعّالة: Active Badge**

تم تصميمه نظام تحديد الموقع باستخدام العلّامات الفعّالة [26] من أجل تحديد موقع تجهيزات بسيطة محمولة تسمّى العلّامات (Badge) وذلك ضمن مبنى ما. يستخدم هذا النظام الأشعة تحت الحمراء كإشارة لاسلكية ويعتمد على خصائص هذه الأشعة من حيث عدم قدرتها على النفاذ من خلال الجدران وذلك لاستنتاج معلومات حول موقع الهدف. تقوم العلّامات وبشكل دوري بإرسال المعرّف الخاص بها على مستوى النظام عن طريق الأشعة تحت الحمراء إلى المستقبلات الموجودة ضمن المبنى(حيث يتواجد على الأقل مستقبل وحيد في كل غرفة من الغرف)، و يتولّى مخدّم مركزي

الربط بين هذه المعرّفات والمستقبلات ومواقع هذه المستقبلات، حيث يمكن استعلام هذا المخدّم عن موقع أي علّامة من العلّامات.

من مميزات هذه الطريقة مناعتها النسبية تجاه عدم موثوقية القنوات اللاسلكية، وذلك كون تحديد موقع العقدة يتم بالاعتماد على وجود اتصال بين العقدة والعقدة المرشدة والذي يتكرر كثيراً مع مرور الزمن وبالتالي يمكن تجاوز التقلبات الآنية في الأقنية اللاسلكية.

- **المكتب الفعّال: Active office**

يهدف هذا النظام أيضاً إلى تحديد مواقع العقد ضمن الأبنية [22] ، يعتمد على الأمواج فوق الصوتية كوسيط إرسال ويتم وضع المستقبلات ضمن البناء في الأسقف مرتبة بشكل مصفوفة، والجهاز المراد تحديد موقعه مزود بمرسل فوق صوتي.

لتحديد موقع جهاز ما يقوم المتحكم الرئيسي في النظام بإرسال إشارة راديوية على شكل تعميم لكل الشبكة، تحتوي على معرّف الجهاز المطلوب، عندما يستلم الجهاز هذه الرسالة يقوم بإرسال إشارة فوق صوتية يتم استقبالها من قبل مصفوفة المستقبلات والتي تقوم بدورها بقياس زمن الوصول ومن ثم حساب الفاصل بين زمني وصول الإشارة الراديوية (من المتحكم المركزي) والإشارة فوق الصوتية (من الجهاز المراد تحديد موقعه) وباستخدام هذا الوقت يمكن تقدير المسافة من قبل كل مستقبل من المستقبلات ومن ثم يتم الاعتماد على تقنية Multilateration في المتحكم المركزي لمعرفة موقع هذا الجهاز المتحرك، يتم تكرار إرسال الإشارة الراديوية كل ٢٠٠ ميلي ثانية وهذا ما يسمح للجهاز بأن يكون بحالة سكون في معظم الوقت.

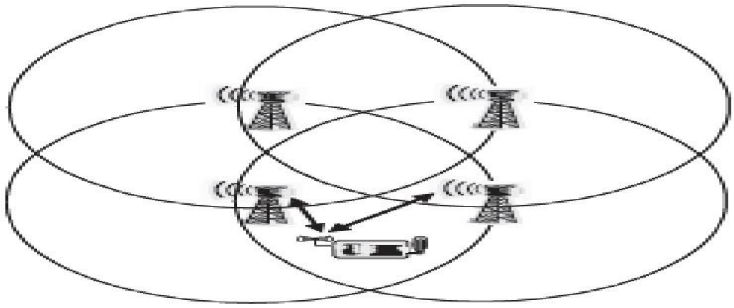
- **كريكت Cricket**

في الأنظمة التي تم مناقشتها سابقاً تقوم البنية التحتية الخاصة بالنظام بتحديد موقع الجهاز، لكن بعض التطبيقات تتطلب أن تقوم هذه الأجهزة بتحديد موقعها ذاتياً(عندما تكون الخصوصية اعتباراً يجب مراعاته). نظام الكريكت [27] هو أحد الأمثلة على هذا النوع من الأنظمة، يعتمد هذا النظام على نشر عقد ثابتة ضمن الأبنية وتؤمن هذه العقد الثابتة إشارات راديوية وفوق صوتية لتتمكن العقد التي تريد تحديد موقعها من إجراء قياس TDoA، ومن خلال هذه المعلومات يمكن أن تحصل العقد على معلومات رمزية حول موقعها ضمن البناء.

• **الاتصالية المتداخلة : Overlapping connectivity**

قدّم Bulusu ومساعدوه في [28] توصيفاً لنظام تحديد المواقع خارج الأبنية، يعمل بدون قياسات رقمية للمدى (المسافة أو الزاوية)، يعتمد عوضاً عن ذلك على مراقبة الاتصال مع العقد المرشدة المحيطة وذلك لتحديد موقع العقدة الحالية، يعتمد هذا النظام على الفرضية التالية: إن الإرسال بطاقة ثابتة ومعلومة من العقدة المرشدة يمكن أن يتم استقباله ضمن دائرة نصف قطرها معلوم. تقوم العقد المرشدة وبشكل دوري بعمليات إرسال لتعلن عن نفسها (من الممكن أن يحتوي هذا الإرسال على موقع العقدة المرشدة..) وحالما تستقبل العقدة هذه الإعلانات من جميع العقد المرشدة المحيطة بها تدرك أن موقعها الحالي هو ضمن تقاطع الدوائر الناتجة عن العقد المرشدة كما هو موضح بالشكل (٦.٣)، ويمكن اعتبار المتوسط الرياضي لمواقع هذه العقد تقدير جيد لموقع العقد. في حال كانت العقدة على معرفة بكل العقد الثابتة المستخدمة فإن عدم سماعها لإعلان إحدى هذه العقد المرشدة يعني أنها تقع خارج دائرة تغطية العقد المرشدة ويمكن استخدام هذه المعلومة لتحسين تقدير موقع العقد.

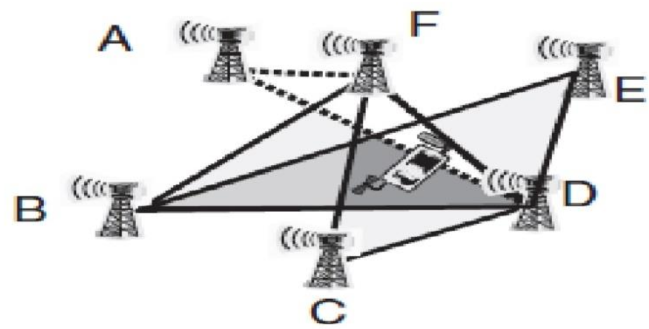
تعتمد دقة نتائج هذه المنظومة على عدد العقد المرشدة المستخدمة فكلما زادت هذه العقد كلما زادت دقة هذه المنظومة. بالإضافة إلى أن دقة الموقع تنخفض في حال كانت منطقة التغطية ليست دائرية (وهي الحالة الواقعية) بالإضافة إلى أنه يجب اختيار مدى إرسال العقد المرشدة بدقة بناءً على المساحة المراد تغطيتها وعدد العقد المرشدة.



شكل (٦.٣) آلية عمل منظومة الاتصالية المتداخلة

• **النقطة التقريبية في المثلث: Approximate point in triangle**

تعتمد الطرق التي تم ذكرها سابقاً على آلية مستقلة عن تحديد المدى (Range Free) لاتخاذ قرار حول موقع العقدة مجهولة الموقع، هل هذا الموقع ضمن الدائرة المحيطة بالعقدة الثابتة أم لا، لكن في الحقيقة يمكن استخلاص الكثير من المعلومات من خلال الاتصال بين العقد. تعتمد الطريقة الحالية على معرفة فيما إذا كانت العقدة داخل أو خارج مثلث مشكل من ثلاث عقد مرشدة ليست على استقامة واحدة [29] وبالتالي تستطيع العقدة مقاطعة عدة مثلثات وتقدير موقعها الحالي (مشابه للتقاطع بين الدوائر الذي تم مناقشته مسبقاً).

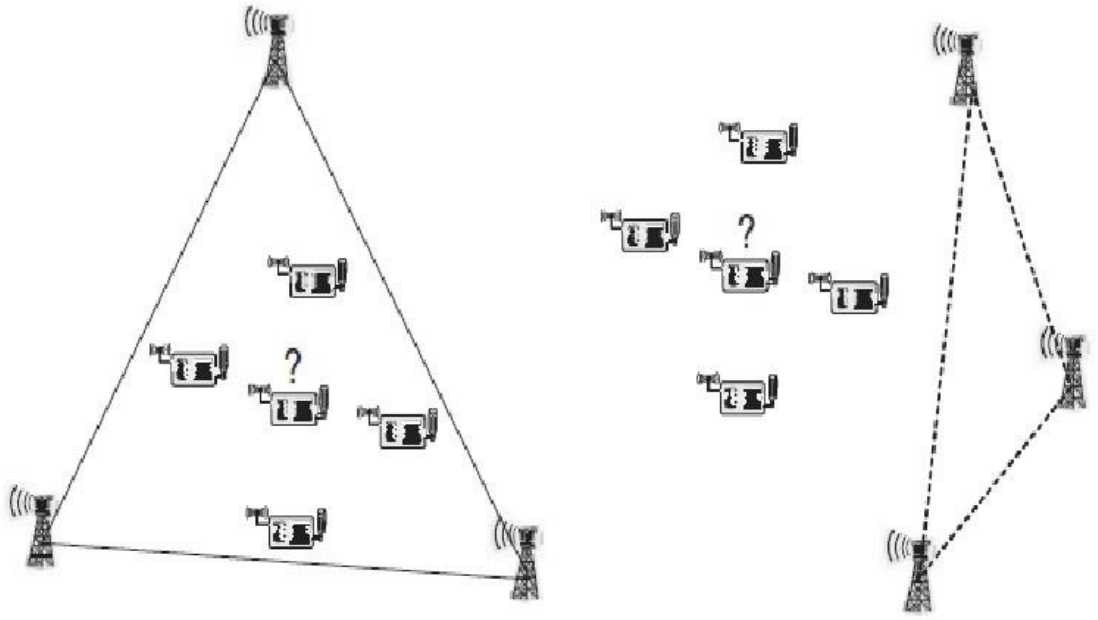


شكل (٧.٣) آلية عمل منظومة النقطة التقريبية في المثلث

يوضح الشكل (٧.٣) آلية العمل. تكتشف العقدة أنها داخل المثلثات (EDB) و (FDC) و (ABD) وخارج المثلثات (BCF) و (AFB) و (FED) ، وبالتالي تستطيع تقدير موقعها على أنه مكان ما ضمن المنطقة المظللة.

لكي تستطيع العقدة معرفة إذا كانت داخل مثلث مكوّن من ثلاث عقد مرشدة ليست على استقامة واحدة (منتقاة عشوائياً) يجب عليها معرفة ماذا سيحصل إذا تحركت داخل المثلث بغض النظر عن اتجاه الحركة، في هذه الحالة يجب أن تقترب العقدة المتحركة إلى إحدى رؤوس المثلث على الأقل. أما إذا كانت العقدة خارج المثلث فإنه يوجد على الأقل يوجد اتجاه وحيد إذا تحركت وفقه العقدة سوف تبتعد عن كل رؤوس المثلث.

في شبكات الحساسات اللاسلكية من الصعب تحريك الحساس وذلك بهدف معرفة موقعه، لذلك يتم الاستعاضة عن ذلك بقيام العقدة بسؤال جميع الجيران المباشرين عن المسافة التي تفصلهم عن العقد المرشدة التي تشكل رؤوس المثلث ومن ثم مقارنة النتائج مع المسافة التي تفصل العقدة الحالية عن رؤوس المثلث. تعتبر العقدة الحالية داخل المثلث إذا كان من أجل كل العقد المجاورة، يوجد على الأقل عقدة مرشدة أقرب للعقدة الجارة من العقدة الحالية، وإلا فهي خارج المثلث. كما هو موضح بالشكل (٨.٣) من الممكن تقدير أي العقدتين أقرب للعقدة المرشدة عن طريق مقارنة قيم RSSI الخاص بالعقدتين. إن الخطأ الذي يظهر في هذه الطريقة ناتج عن مقارنة قيم RSSI للعقد والذي يعتبر مصدر للأخطاء، بالإضافة لمحدودية عدد العقد الجارة. لذلك يكون أداء هذه الطريقة أفضل في حال زيادة كثافة العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية حيث يقل احتمال الخطأ.

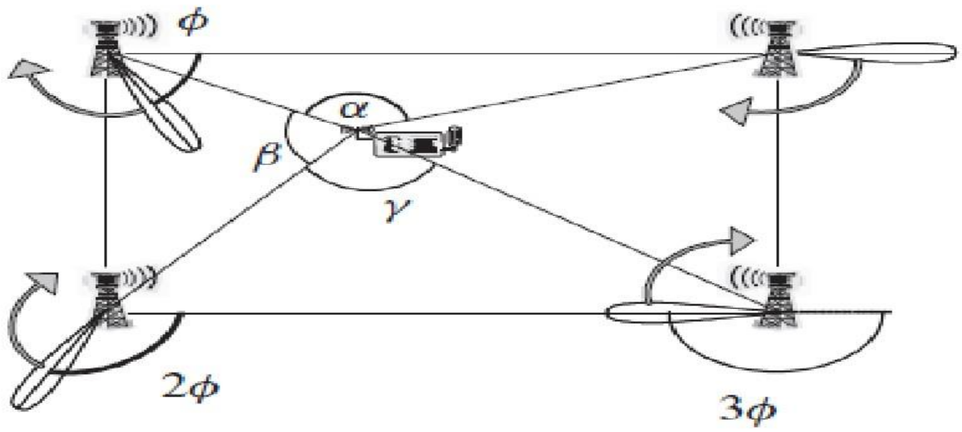


شكل (٨.٣) الاختبار الذي تقوم به العقدة (التي تعلوها إشارة استفهام) لتحديد إذا كانت داخل المثلث أو خارجه

- **استخدام معلومات زاوية الوصول:**

تم توصيف طريقة للحصول على معلومات الزاوية في شبكات الحساسات اللاسلكية، تقوم باستخدام عقد مرشدة باستطاعتها إرسال حزمة (Beam) ضيّقة دوّارة، وسرعة دوران هذه الحزمة ثابتة ومعروفة لدى كل العقد، بالتالي تستطيع العقد قياس زمن وصول كل حزمة من هذه الحزم ومن

ثم قياس الفارق بين وصولين متتاليين وتحديد الزوايا γ, β, α كما هو موضح بالشكل (٩.٣) وذلك باستخدام العلاقات الهندسية البسيطة [30]. إحدى التحديات التي تواجه هذه التقنية هي التأكد من أن الحزمة ضيّقة بشكل كافٍ (يفضل أن تكون أقل من ١٥ درجة) بحيث تؤمن للعقد نقطة قدح واضحة لبدء حساب الوقت. من مميزات هذه الطريقة أنها لا تتأثر بكثافة العقد في الشبكة ولا تسبب أي حمل زائد على الحركة ضمنها.



شكل (٩.٣) تحديد الموقع باستخدام الحزمة الدوارة

٣-٦ تحديد الموقع في بيئة مكوّنة من عدة قفزات:

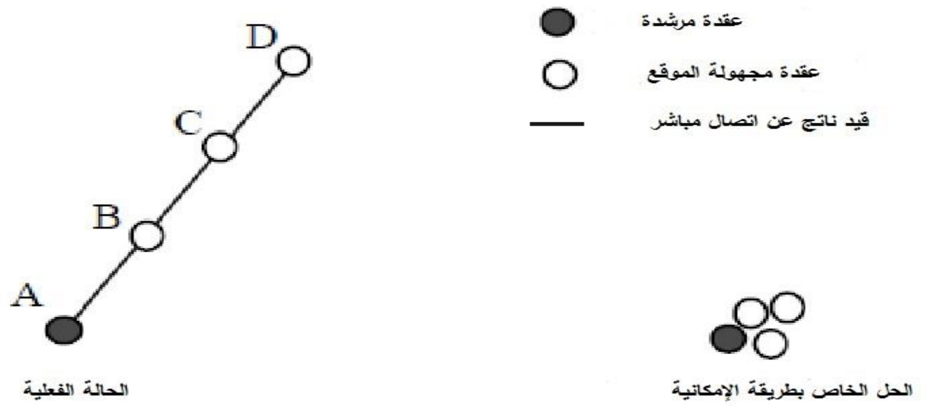
جميع التقنيات التي تم مناقشتها في القسم السابق تفترض أن العقدة التي تريد تحديد موقعها بإمكانها الاتصال وبشكل مباشر مع عقدة مرشدة أو أكثر. هذه الفرضية غير صحيحة في شبكات الحساسات اللاسلكية بشكل عام، وبالتالي ظهرت الحاجة لآليات جديدة تستطيع بطريقة ما تجاوز مشكلة المحدودية الجغرافية لمعلومات الموقع الدقيقة المتمثلة بالعقد المرشدة. فيما يلي مجموعة من هذه الطرق:

- **صياغة الإمكانية كبرنامج شبه قطعي:**

A semi definite program feasibility formulation

تعتمد هذه الطريقة على معلومات الاتصالات بين العقد لتحديد مواقع العقد حيث تعالج هذه المشكلة كمشكلة إمكانية (Feasibility problem). بفرض لدينا n عقدة مرشدة معلومة الموقع ولدينا m عقدة مجهولة الموقع يجب تحديد موقعها. يمكن أن يوجد اتصال بين عقدتين ما فقط إذا

كانتا تبعدان عن بعضهما مسافة أقل أو تساوي R (مدى إرسال الإشارة اللاسلكية) وفي حال وجود اتصال بين عقدتين ما في الشبكة فلدى كيان مركزي معلومات عن وجود هذا الاتصال. حقيقة أن العقدتين متصلتين مباشرة تقدم قيوداً لمشكلة الإمكانية (العقدتان المتصلتان لا تبعدان عن بعضهما أكثر من نصف قطر الإرسال) وبالتالي يمكن توليد أكثر من قيد لكل عقدة من العقد وذلك حسب كثافة العقد في الشبكة ويجب أن يتم الإيفاء بجميع القيود لجميع العقد ضمن الشبكة والذي من شأنه أن يحد كثيراً من الموقع المحتمل للعقد.



شكل (١٠.٣) عدم إبعاد العقد عن بعضها في طريقة صياغة الإمكانية

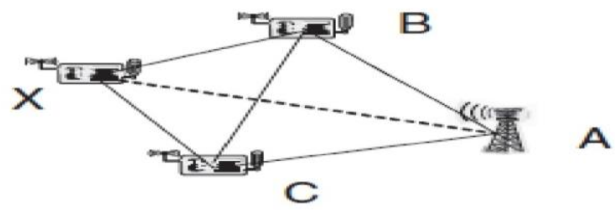
بناءً على الصياغة السابقة قام الباحثون في [31] بصياغة مشكلة الإمكانية كبرنامج شبه قطعي وذلك بالاعتماد على الجبر الخطي، حيث بالإمكان حل هذه المشكلة ولكن فقط بآلية مركزية تتطلب جمع كل معلومات الاتصالات بين العقد ضمن كيان مركزي. من الملاحظ أنه باستخدام هذه الصياغة لا يمكن الاستفادة من المعلومات المتاحة حول انعدام الاتصال المباشر بين عقدتين (حيث لا يمكن كتابة قيد يتضمن أن عقدتين تبتعدان عن بعضهما مسافة على الأقل $R + 1$ وذلك في البرنامج شبه القطعي)، وبالتالي لا يمكن تفريق العقد (إبعادها) عن بعضها البعض وبالتالي السلسلة الخطية من العقد التي تتضمن عقدة مرشدة وحيدة لا يمكن تفريقها عن حالة جميع العقد موزعة بشكل عنقود حول العقدة المرشدة كما هو موضح بالشكل(١٠.٣) وبالتالي يستحسن أن يتم توزيع العقد المرشدة على حدود شبكة الحساسات اللاسلكية لتقليل معدّل الخطأ.

- **تقدير المسافة في بيئة متعددة القفزات: Multi hop range estimation**

تتطلب طريقة Multilateration أن تقوم العقدة بتقدير المسافة التي تفصلها عن ثلاث عقد مرشدة على الأقل وذلك ليتم تقدير موقع هذه العقدة، تمت دراسة هذه المشكلة في حالة أن العقد المرشدة لا تستطيع توفير تقدير المسافة لكل العقد الموجودة في الشبكة وإنما فقط لعدد محدود من هذه العقد التي تقع بجوار العقد المرشدة وذلك بسبب محدودية طاقة الإرسال للعقد المرشدة، والحل المقترح يتمثل باستخدام تقدير المسافة غير المباشر (عن طريق عدة قفزات) وذلك بهدف إتاحة إمكانية استخدام طريقة Multilateration [32].

لتقدير المدى الذي يفصل عقدة ما عن عقدة مرشدة تفصل بينهما أكثر من قفزة تم اقتراح ثلاث طرق مختلفة، تعتمد جميعها على إغراق الشبكة بالمعلومات حول مواقع العقد المرشدة وذلك بشكل مشابه للإجراء المتبع في بروتوكول التوجيه *Distance vector*. الطريقة الأولى وهي الأبسط وتسمّى (*DV–Hop*) حيث يتم حساب عدد القفزات التي تفصل بين أي عقدتين مرشدتين عبر المسار الأقصر الذي يفصل بينهما ومن ثم يتم تقدير طول القفزة الواحدة بتقسيم مجموع مسافات القفزات على عدد القفزات. تقوم كل عقدة مرشدة بتقدير طول القفزة الوحيدة ومن ثم تقوم بنشر هذه المعلومة عبر الشبكة. تقوم العقد التي لا تدرك موقعها باستخدام هذه المعلومات (تقدير القفزة الوحيدة بالإضافة لعدد القفزات التي تفصلها عن باقي العقد المرشدة) لإيجاد تقدير للمسافة التي تفصلها عن العقد المرشدة ومن ثم إجراء عملية Multilateration .

في حال كان المدى الذي يفصل بين العقد المجاورة والعقد المرشدة متوفراً فيمكن استخدامه بنفس الآلية ضمن ما يسمى (*DV–Distance*)، ففي حال توفر عدد كافٍ من الجيران تستطيع العقدة حساب المسافة الإقليدية التي تفصلها عن العقد المرشدة البعيدة. كما هو موضح بالشكل (١١.٣).

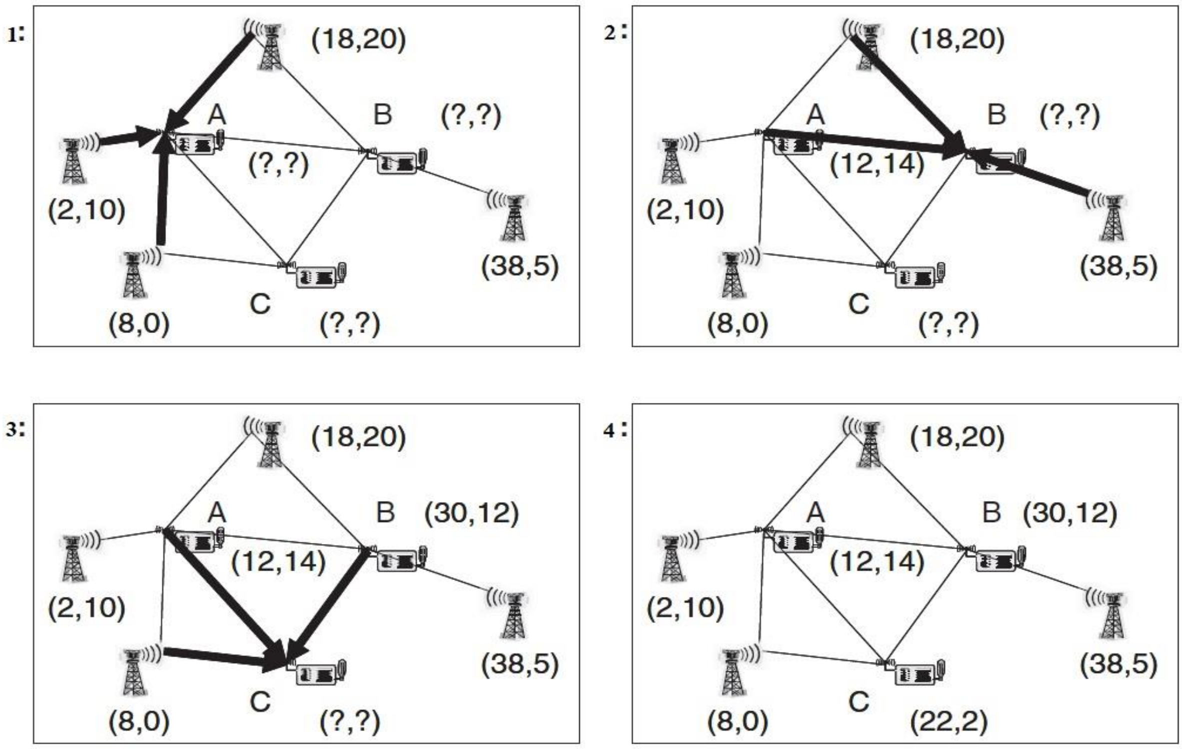


شكل (١١.٣) حساب المسافة الإقليدية فى غياب الاتصال المباشر بين العقدة (X) والعقدة المرشدة

تعتمد الدقة التي نحصل عليها في هذه الطريقة على نسبة العقد المرشدة بالنسبة للعدد الكلي للعقد ضمن الشبكة، حيث بازدياد عدد العقد المرشدة تزداد دقة هذه الطريقة.

- **Miltilateration التكراري والتعاوني:**

تعتمد الطريقة السابقة على تقدير المسافة بين العقد مجهولة الموقع والعقد المرشدة وذلك بهدف تطبيق Multilateration بين هذه العقد والعقد الثابتة، إحدى الطرق البديلة الممكنة هي استخدام العقد العادية حالما يتم تقدير موقع هذه العقد. يوضح الشكل (١٢.٣) مثالاً على ذلك، العقد A,B,C لا تعرف موقعها، تستطيع العقدة A تحديد موقعها بالاعتماد على ثلاث عقد مرشدة مجاورة لها وحالما يتم ذلك تستطيع العقدة B تحديد موقعها وتزود العقدة C بالمعلومات اللازمة لتستطيع تحديد موقعها [21].

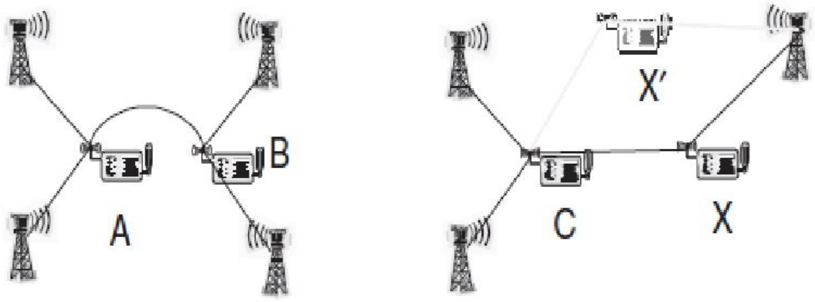


شكل (١٢.٣) تكرار عملية Multilateration

حيث تبدأ عملية تحديد الموقع ابتداءً من العقدة التي لا تدرك موقعها وتملك اتصالاً مباشراً مع عدد كافٍ من العقد المرشدة أو العقد التي عرفت موقعها ومن ثم يتم تكرار هذه العملية وحساب مواقع العقد. ينتج عن ذلك تقدير أولي لمواقع العقد وحالما يتوفر مزيد من المعلومات (على سبيل المثال

ازدياد عدد الجيران الذين عرفوا مواقعهم) فمن الممكن استخدام هذه المعلومات لتحسين تقدير الموقع ونشر هذا التحسين للعقد المجاورة. وذلك بهدف أن تتقارب هذه الخوارزمية إلى الموقع الصحيح لكل العقد. تجدر الإشارة إلى أن الحساب الأولي للموقع والذي يعتبر مدخل عملية التحسين التكرارية يمكن حسابه باستخدام طرق أخرى مثل *DV–Hop* أو *DV–Distance* التي تمت مناقشتها مسبقاً. يعتمد معدّل الخطأ في الموقع بعد عملية التحسين التكرارية على دقة حساب المسافة والحساب الأولي للموقع، و متوسط عدد الجيران وعدد العقد المرشدة بالإضافة إلى أنه من غير المضمون أبداً أن تتقارب خوارزمية التحسين إلى المواقع الصحيحة حيث يوجد بعض الحالات التي يزداد فيها خطأ الموقع مع ازدياد فترة عمل هذه الخوارزمية بسبب انتشار الخطأ عبر الشبكة.

أحد التحديات الخاصة بهذه الخوارزمية يحدث عندما لا تتوفر لكل العقد في الشبكة ثلاث عقد جارة على الأقل تعرف موقعها. اعتماداً على طريقة توزع العقد في الشبكة من الممكن أن يتم الحصول على معلومات جزئية عن الموقع وتسمى هذه الحالة Collaborative Multilateration [33] يوضح الشكل (١٣.٣) هذه المشكلة في السيناريو على جهة اليسار يتوفر للعقدة عدد كافٍ من الجيران لتستطيع تحديد موقعها، أما في السيناريو على جهة اليمين فمن المحتمل أن تكون العقدة المراد تحديد موقعها في الموقع X أو X' ولا يمكن تحديد أي منهما بالضبط هو الصحيح.



شكل (١٣.٣) مشكلة Multilateration التكراري

تتأثر دقة هذه الطريقة بعدد من المعاملات مثل متوسط عدد الجيران المحيطين بالعقدة (لضمان دقة جيدة يجب أن يتوفر أكثر من ١٠عقد جارة لكل عقدة كمتوسط) بالإضافة لأن تكون نسبة العقد المرشدة على الأقل ٥% من العدد الكلي للعقد، مع مراعاة وضع العقد المرشدة بالقرب من حدود الشبكة.

٣-٧ الخلاصة

تمّ في هذا الفصل استعراض التقنيات المستخدمة في تحديد مواقع العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية. تعتمد هذه التقنيات على قياسات متبادلة بين العقد وعلى العقد المرشدة لتحديد مواقع العقد المجهولة الموقع. أوضح هذا الفصل وجود عدد من العوامل التي تؤدي لوجود أخطاء في مواقع العقد، ومن هذه العوامل عدم دقّة القياسات التي تقوم بها العقد، و كثافة العقد ضمن الشبكة، و نسبة العقد المرشدة المعروفة الموقع بدقة بالنسبة للعدد الكلي للعقد ضمن الشبكة.

الفصل الرابع: بروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية

تخضع شبكات الحساسات اللاسلكية لقيود في مصادر الطاقة وعرض الحزمة المتاحة للاتصال ومحدودية القدرة على المعالجة. تشكل هذه القيود – بالإضافة إلى العدد الكبير للعقد ضمن الشبكة– عدداً من التحديات التي تواجه تصميم و إدارة شبكات الحساسات اللاسلكية، و تفرض هذه التحديات الحاجة إلى كفاءة في استهلاك الطاقة في جميع طبقات الشبكة. إن المهمة الرئيسية لطبقة الشبكة هي إيجاد طريقة لإنشاء المسارات وتوجيه البيانات بموثوقية من المصادر إلى المصرف مع مراعاة الكفاءة في استهلاك الطاقة، وذلك بهدف إطالة عمر الشبكة لأقصى حد ممكن.

يواجه التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية عدداً من التحديات نظراً للخصائص التي تميّز هذه الشبكات عن غيرها من الشبكات اللاسلكية. من هذه التحديات عدم وجود إمكانية لبناء نموذج عنونة شامل لجميع العقد في هذه الشبكات نظراً لأنها تتألف من عدد كبير من العقد، وسوف يستهلك هذا النموذج قسماً كبيراً من موارد عقد الشبكة، لذلك فإن نموذج IP التقليدي لايمكن تطبيقه على هذا النوع من الشبكات.أيضاً فإن هذه الشبكات بخلاف شبكات الاتصالات التقليدية، تتطلب معظم تطبيقاتها تدفق البيانات من عدة مصادر إلى مصرف واحد. بالإضافة إلى أن البيانات التي تولدها العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية تحوي مقداراً كبيراً من التكرار لوجود عقد متجاورة تستشعر نفس البيانات من الوسط المحيط، ولا بدّ لبروتوكولات التوجيه من كشف هذا التكرار وإزالته وذلك للتقليل من استهلاك الطاقة وتحقيق استثمار أمثل لموارد الطاقة.

نتيجة هذه الخصائص المميزة لهذه الشبكات تم اقتراح عدد من الخوارزميات لحل مشكلة التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية. تأخذ هذه الخوارزميات بعين الاعتبار هذه الخصائص بالإضافة إلى مراعاة متطلبات التطبيقات وبنية الشبكة. يمكن تصنيف بروتوكولات التوجيه كالتالي:

- بروتوكولات مركزية البيانات (Data centric): تعتمد هذه البروتوكولات على الاستعلامات وتسمية البيانات المراد الحصول عليها وهذا ما يساعد في التخلص من التكرار و تقليل عمليات الإرسال.
- البروتوكولات الهرمية: تعتمد هذه البروتوكولات على عنقدة الحساسات، تقوم رؤوس العناقيد بعمليات تجميع البيانات بهدف تقليل حجمها وتوفير استهلاك الطاقة.
- البروتوكولات المعتمدة على مواقع العقد: تستخدم هذه البروتوكولات معلومات مواقع العقد لتسيير البيانات باتجاه مناطق محددة.

- بروتوكولات التوجيه التي تعتمد على نمذجة التدفق ضمن الشبكة: تسعى هذه البروتوكولات لتحقيق متطلبات جودة الخدمة بالإضافة لعمليات التوجيه.

٤-١ بنية الشبكة وأثرها في بروتوكولات التوجيه:

تختلف بنية شبكات الحساسات اللاسلكية والأهداف والتحديات التصميمية باختلاف تطبيقات هذه الشبكات، وبما أن أداء بروتوكولات التوجيه مرتبط بشكل كبير ببنية الشبكة، سنوضح فيمايلي بعض المسائل التي تتعلق ببنية الشبكة وأثرها في بروتوكولات التوجيه.

- **تغيرات الشبكة Network dynamics:**

يمكن تمييز ثلاثة مكونات رئيسية في شبكات الحساسات اللاسلكية، وهي العقد الحساسة والمصرف والأحداث التي تتم مراقبتها. بعيداً عن بعض الحالات التي تتطلب استخدام عقد حساسة متحركة، فإن معظم بنى هذه الشبكات تفترض استخدام عقد حساسة ثابتة، على الجانب الآخر قد تتطلب بعض التطبيقات أن تدعم بنية الشبكة المصرف المتحرك او حركة رؤوس العناقيد [34] . تؤثر حركة المصرف أو العقد الحساسة في عملية التوجيه، على اعتبار أن توجيه الرسائل من و إلى المصرف المتحرك أو العقد المتحركة يشكّل تحدياً أكبر من كون المصرف والعقد ثابتة، ذلك بسبب حاجة بروتوكولات التوجيه للبحث عن مسارات مستقرة، وتصبح مسألة إيجاد هذه المسارات المستقرّة مهمّة جداً لتحسين أداء هذه البروتوكولات، بالإضافة للمسائل الأخرى كاستهلاك الطاقة واستخدام عرض الحزمة المتاحة. من الممكن أن يكون الحدث الذي تقوم الشبكة بمراقبته إما ثابتاً أو متحركاً وذلك بناءً على نوع التطبيق [35]. في تطبيقات متابعة وكشف الأهداف تكون هذه الأحداث أو الظواهر متحركة، في حين أنّه في تطبيق مراقبة الغابات للإنذار المبكر عن الحرائق تكون الأحداث ثابتة. إن مراقبة الأحداث الثابتة تمكّن الشبكة من العمل في نمط رد الفعل (reactive)، حيث توّلد التقارير وترسلها للمصرف فقط عند وقوع هذه الأحداث، في حين أن مراقبة الأحداث المتحركة تتطلب من الشبكة في معظم التطبيقات أن تقوم بتوليد كميات كبيرة من التقارير بشكل دوري ومن ثم توجيهها إلى المصرف.

- **نشر العقد Node deployment:**

تعتبر الطبولوجيا التي تم نشر العقد وفقها من العوامل الأخرى التي تؤثر في بروتوكولات التوجيه. ترتبط آلية نشر العقد بنوع التطبيق وتؤثر بشكل كبير في أداء بروتوكولات التوجيه. يمكن أن يتم نشر العقد ضمن البيئة إما بشكل مخطّط و محددّ مسبقاً (Deterministic) أو بشكل عشوائي. في النشر المحددّ بشكل مسبق يتم توزيع العقد بشكل يدوي ضمن بيئة العمل، وبالتالي يتم توجيه البيانات عبر مسارات محدّدة. أما في النشر العشوائي، يتم توزيع العقد بشكل عشوائي ومن ثم تقوم هذه العقد وبشكل تعاوني بتشكيل البنية التحتية للشبكة وفق النمط الغرضي (ad–hoc). في هذه الحالة يكون موقع المصرف أو رؤوس العناقيد هاماً جداً وله أثر كبير في استهلاك الطاقة وأداء الشبكة، وفي حال كان توزيع العقد غير منتظم عبر البيئة تظهر الحاجة إلى عنقدة بشكل أمثلي وذلك لضمان الكفاءة في استهلاك الطاقة أثناء قيام الشبكة بعملها.

- **الاعتبارات الطاقية Energy consideration:**

أثناء إنشاء البنية التحتية الخاصة بشبكات الحساسات اللاسلكية، تتأثر عملية إنشاء المسارات بمقدار الطاقة المتوفرة لدى العقد، وذلك كون الطاقة اللازمة للإرسال إلى مسافة معينة تتناسب طرداً مع مربع المسافة(يمكن أن تتناسب مع مكعّب أو أس أعلى وذلك حسب العوائق ونسبة الضجيج بالوسط). بالرغم من أن التوجيه عبر عدة قفزات يستهلك مقدار أقل من الطاقة بالمقارنة مع الاتصال المباشر، ولكنه يسبب حملاً زائداً من أجل إدارة طبولوجيا الشبكة والتحكم بالوصول إلى وسط الإرسال. يكون أداء التوجيه المباشر(عبر قفزة واحدة من المصدر للمصرف) جيداً في حال كل العقد قريبة إلى المصرف، ولكن أغلب تطبيقات هذه الشبكات تتطلب نشراً عشوائياً للعقد ضمن البيئة التي تمتد على مساحة واسعة، وبالتالي فإن التوجيه عبر عدة قفزات لايمكن تجنبه.

- **نموذج تسليم البياناتData Delivery Model:**

يختلف نموذج تسليم البيانات إلى المصرف باختلاف التطبيق، فمن الممكن أن يتم تسليم البيانات للمصرف بشكل مستمر، أو بناءً على أحداث معينة Event Driven، أو رداً على استعلامات المصرف Query Driven، أو بشكل هجين من الأشكال السابقة. في نموذج التسليم المستمر، تقوم كل عقدة من العقد وبشكل دوري بإرسال البيانات باتجاه المصرف. أما في النموذج المبنى على

الأحداث ونموذج الرد على الاستعلامات، فإن العقد تبدأ عملية إرسال البيانات إلى المصرف في حال وقوع حدث معّين أو في حال ورود استعلام من المصرف. بعض التطبيقات تستخدم نماذج هجينة من النماذج السابقة. يتأثر بروتوكول التوجيه بشكل كبير بنموذج تسليم البيانات وخاصةً فيما يتعلق بتخفيض استهلاك الطاقة واستقرار المسارات. فعلى سبيل المثال توصلت فإن بروتوكولات التوجيه الهرمية هي الأكثر ملاءمة لتطبيقات مراقبة السلوك ضمن البيئة، والتي تتطلب أن يتم إرسال البيانات بشكل مستمر إلى المصرف، ذلك كون هذه التطبيقات توّلد كمياتٍ كبيرةً من المعطيات المكرّرة، والتي يمكن تجميعها ضمن الشبكة أثناء توجيهها إلى المصرف، والذي من شأنه تقليل الحركة عبر الشبكة وتوفير استهلاك الطاقة [36] .

- **إمكانات العقدة Node Capabilities:**

يوجد عدد من المهام التي يمكن إسنادها للعقد في شبكات الحساسات اللاسلكية. افترضت بعض الدراسات [37,38,39] أن جميع العقد في الشبكة متماثلة، لها نفس الموارد من حيث الاتصالات والطاقة. بناءً على نوع التطبيق يمكن أن يتم إسناد مهمة محددّة للعقدة كنقل البيانات أو استشعار الوسط أو تجميع البيانات، وذلك على اعتبار أن إسناد جميع هذه المهام إلى كل عقدة يؤدي إلى استهلاك موارد الطاقة لديها بشكل سريع. بعض بروتوكولات التوجيه الهرمية تفترض أن العقد رؤوس العناقيد هي عقد متميزة عن باقي العقد في الشبكة من حيث مصادر الطاقة وعرض الحزمة المتاح والذاكرة [41,40]، في هذه الحالات تتولى هذه العقد مهمّة الإرسال إلى المصرف وتجميع البيانات، في حين أن بعضها الآخر يختار العقد رؤوس العناقيد من العقد المنشورة في الوسط [42,43,44]. إن تضمين عقد غير متماثلة ضمن شبكة الحساسات يؤدي إلى ظهور عدة مشاكل تقنية تتعلق بالتوجيه [45]، فعلى سبيل المثال بعض التطبيقات تتطلب مزيجاً من العقد لمراقبة درجة الحرارة والضغط والرطوبة في الوسط المحيط، وكشف الحركة عن طريق البصمة الصوتية والحصول على صور أو فيديو لمتابعة الأهداف المتحركة. إن القراءات المتوّلدة عن هذه العقد تشكل تدفقات بيانات بمعدلات مختلفة، وتخضع لقيود مختلفة من حيث جودة الخدمة، وتتبع نماذج مختلفة لتسليم البيانات، لذلك تمثّل هذه البيئات الهجينة تحدياً كبيراً لعملية التوجيه.

- **تجميع وتنعيم البيانات Data aggregation and fusion:**

تولد العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية كماً كبيراً من البيانات المكررة، وبالتالي من الممكن تجميع الرزم القادمة من عدة عقد بهدف تقليل عمليات الإرسال. يقصد بتجميع البيانات دمج المعطيات القادمة من عدة مصادر باستخدام تابع تجميع مثل تابع الضغط وإزالة التشويش Suppression، أو أخذ القيمة الصغرى أو الكبرى أو متوسط القيم [46]. يمكن تنفيذ هذه التوابع إما جزئياً أو كلياً في عقدة من العقد، وذلك عن طريق السماح للعقد بأن تقوم بذلك بهدف تقليل البيانات ضمن الشبكة [38,43,47]. بما أن العمليات الحسابية تستهلك طاقة أقل من عمليات الاتصال [42]، فإنه من الممكن تحقيق وفر كبير في استهلاك الطاقة عن طريق تجميع البيانات. لقد تم استخدام هذه التقنية لتحقيق الكفاءة في استهلاك الطاقة وتحسين الحركة Traffic Optimization في عدد من بروتوكولات التوجيه مثل بروتوكول MLER و MLDG [38,43,47,48]، بعض بنى شبكات الحساسات اللاسلكية تسند مهمة تجميع البيانات لعقد ذات إمكانيات عالية ومتخصصة [40]. يمكن تحقيق تجميع البيانات عن طريق استخدام تقنيات معالجة الإشارة، في هذه الحالة تسمّى تنعيم البيانات(Data Fusion)، حيث تمتلك العقد إمكانية توليد إشارات أكثر دقة عن طريق تقليل الضجيج واستخدام تقنيات مثل تشكيل الحزم(Beam Forming) لدمج عدة إشارات [42].

٤-٢ بروتوكولات التوجيه مركزية البيانات Data-centric routing protocols:

في معظم تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية، من غير الممكن ربط كل عقدة من العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية بمعرّف خاص مميز على مستوى الشبكة وذلك بسبب العدد الكبير للعقد المستخدمة في الشبكة.

إن عدم امتلاك كل عقدة من العقد لمعرّف خاص بالإضافة إلى النشر العشوائي للعقد يصعب تحديد مجموعة معينة من العقد ليتم الحصول منها على بيانات حول الوسط، لذلك يتم إرسال البيانات من كل العقد في الشبكة، وهذا مايسبب وجود كم هائل من البيانات المكررة. تعتبر هذه الآلية غير فعّالة من حيث استهلاك الطاقة، ولذلك تم الأخذ بعين الاعتبار بروتوكولات التوجيه التي تملك القدرة على اختيار مجموعة

محددّة من العقد، وتستخدم تقنيات تجميع البيانات أثناء نقل هذه البيانات من المصادر باتجاه المصرف. هذا ما أدى إلى ظهور التوجيه مركزي البيانات (Data centric) والذي يختلف عن التوجيه التقليدي المعتمد على العنونة وإنشاء المسارات بين عقد لها عناوين مميزة، تتم إدارتها ضمن طبقة الشبكة من مكدّس الاتصالات (Communication Stack).

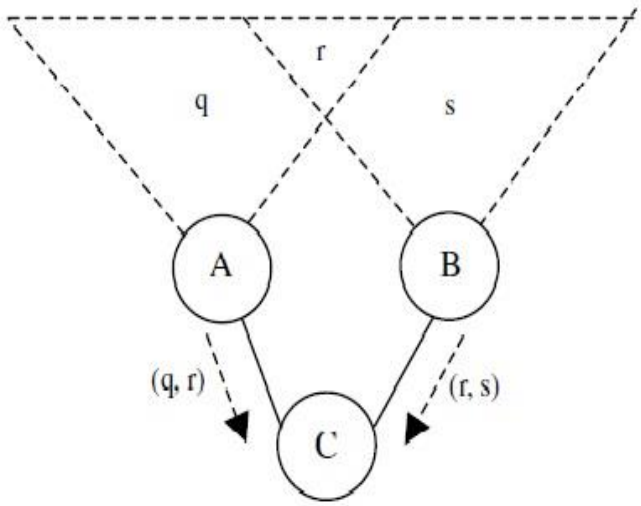
في التوجيه مركزي البيانات يقوم المصرف بإرسال استعلامات إلى مناطق محددّة، وينتظر وصول البيانات من العقد الموجودة في المنطقة المستهدفة. يحتاج هذا النوع من التوجيه إلى وجود آلية لتسمية البيانات بناءً على خصائصها، حيث يتم استخدام هذه التسمية من قبل المصرف لتحديد الخصائص التي يحتاجها ضمن الاستعلامات التي يرسلها إلى عقد الشبكة.

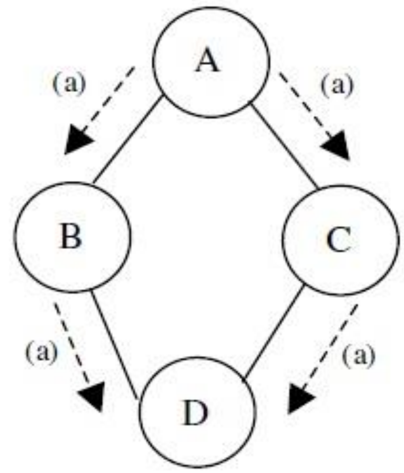
يعتبر بروتوكول SPIN [49] أول بروتوكول من هذا النوع، يعتمد هذا البروتوكول على إجراء مفاوضات بين العقد للتخلص من البيانات المكررة وتقليل استهلاك الطاقة، بعد ذلك تم تطوير بروتوكول النشر الموجه (Directed Diffusion) [38] والذي أصبح طفرة ضمن هذا النمط من البروتوكولات، ومن ثم تم تقديم عدد من المقترحات لبروتوكولات إما تستند على النشر الموجّه [50,48,51] أو تتبع طرق مشابهة [54,53,47,52] .

٤-٢-١ الإغراق ونشر الإشاعات Flooding and Gossiping:

وهما عبارة عن آليتين لنقل البيانات في شبكات الحساسات اللاسلكية من دون الحاجة إلى أي خوارزمية توجيه، أو متابعة لطبولوجيا الشبكة [55]. في الإغراق (Flooding)، عندما تستلم العقدة رزمة بيانات تقوم بتعميم هذه الرزمة إلى كل جيرانها، تستمر هذه العملية حتى تصل الرزمة إلى المصرف أو تصل للحد الأعلى لعدد القفزات فيتم حذفها. يمكن اعتبار نشر الإشاعات (Gossiping) عبارة عن تحسين مبسّط للإغراق حيث تقوم العقدة التي تستلم رزمة بيانات باختيار أحد جيرانها بشكل عشوائي ومن ثم تقوم بإرسال هذه الرزمة إلى الجار الذي تم اختياره، والذي بدوره يقوم بتكرار هذه العلمية لحين وصول الرزمة إلى المصرف أو بلوغ الحد الأقصى لعدد القفزات وبالتالي حذف الرزمة.

يمكن تحقيق الإغراق بسهولة في شبكات الحساسات اللاسلكية، ولكن هناك عدة مساوئ له.





شكل (٤-٢) التداخل

شكل (٤-١) الانفجار الداخلي

كما هو موضح بالشكلين (٤-١) و (٤-٢)، أولى المساوئ أنه يعاني من الانفجار الداخلي (Implosion) والذي ينتج عن إرسال نسختين متطابقتين من الرسالة إلى نفس العقدة من عدة مصادر. ثاني المساوئ أنه يعاني أيضاً من التداخل والذي يحدث عندما تقوم عقدتان باستشعار نفس المنطقة وترسلان رزماً متماثلة إلى نفس الجار. من المساوئ أيضاً عدم استخدام الموارد بالشكل الأمثلي حيث تستهلك هذه الآلية كمية كبيرة من الطاقة، ولا تأخذ محدودية موارد العقد بعين الاعتبار [49]. يتدارك Gossiping مشكلة الانفجار الداخلي باختيار أحد الجيران فقط بشكل عشوائي وذلك ليتم إرسال البيانات إليه، عوضاً عن القيام بتعميم البيانات على كل الجيران، لكن تجدر الملاحظة أن هذا يؤدي إلى تأخير زمني في انتشار البيانات عبر الشبكة.

٤-٢-٢ بروتوكول الحساسات للحصول على المعلومات عن طريق التفاوض

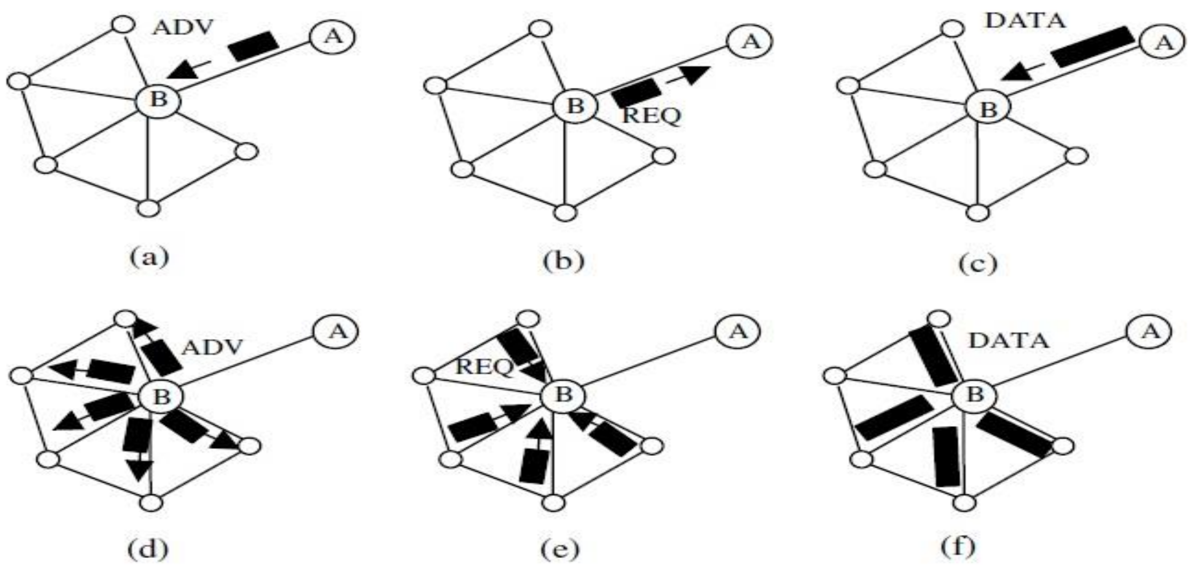
Sensor Protocol for Information via Negotiation:

يعتبر بروتوكول الحساسات للحصول على المعلومات عن طريق التفاوض أو SPIN من أوائل البروتوكولات التي تسعى لتحقيق تقنيات التوجيه مركزي البيانات. يعتمد هذا البروتوكول على فكرة تسمية البيانات باستخدام بيانات تعريفية (Meta Data). قبل أن يتم إرسال البيانات الفعلية يتم تبادل البيانات التعريفية بين العقد بالاعتماد على آلية الإعلان عن البيانات. تعتبر آلية الإعلان عن البيانات الميزة الاساسية لهذا

البروتوكول، حالما تستلم أي عقدة بيانات جديدة تقوم بالإعلان عن هذه البيانات لجيرانها الذين لا تتوفر لديهم هذه البيانات، ولجيرانها الذين لديهم اهتمام بهذه البيانات. قدّم التفاوض باستخدام البيانات التعريفية حلولاً للمشاكل الناتجة عن الإغراق مثل نقل كميات كبيرة من البيانات المكرّرة، والتداخل في المناطق التي تستشعرها العقد وعدم استخدام الموارد بشكل مخطط، وأدت هذه الحلول إلى تخفيض استهلاك الطاقة. لا يوجد نمط معياري للبيانات التعريفية، بل تعتمد على نوع التطبيق. توجد ثلاثة أنواع من الرسائل معرّفة ضمن بروتوكول SPIN لتبادل البيانات وهي:

- رسالة ADV: والتي تمكن المرسل من الإعلان عن بيانات تعريفية محددة.
- رسالة REQ: لطلب بيانات محددة.
- رسالة DATA: والتي تحمل البيانات الفعلية.

يوضح الشكل (٤-٣) الخطوات التي يتبعها بروتوكول SPIN والرسائل المستخدمة.



شكل (٤-٣) بروتوكول SPIN

من مميزات بروتوكول SPIN أن التغيرات في طبولوجيا الشبكة لها أثر محلّي فقط، على اعتبار أن كل عقدة بحاجة لمعرفة جيرانها المباشرين الذين يبتعدون عنها بمقدار قفزة واحدة فقط. يقلل التفاوض عن طريق

البيانات التعريفية من البيانات المكررة لحدود النصف. تجدر الإشارة إلى أن آلية الإعلان عن البيانات في SPIN لا تضمن تسليم البيانات، فعلى سبيل المثال إذا كانت العقدة المهتمة بالبيانات بعيدة جداً عن مصادر هذه البيانات، والعقد الوسيطة بينهما غير مهتمة بهذه البيانات.، في هذه الحالة لن يتم تسليم البيانات من مصادرها إلى العقد المهتمة بها، ولذلك لا يعتبر بروتوكول SPIN خياراً جيداً للتطبيقات التي تتطلب تسليماً موثوقاً للبيانات بشكل دوري مثل أنظمة المراقبة الأمنية لعمليات التسلل والاقتحام.

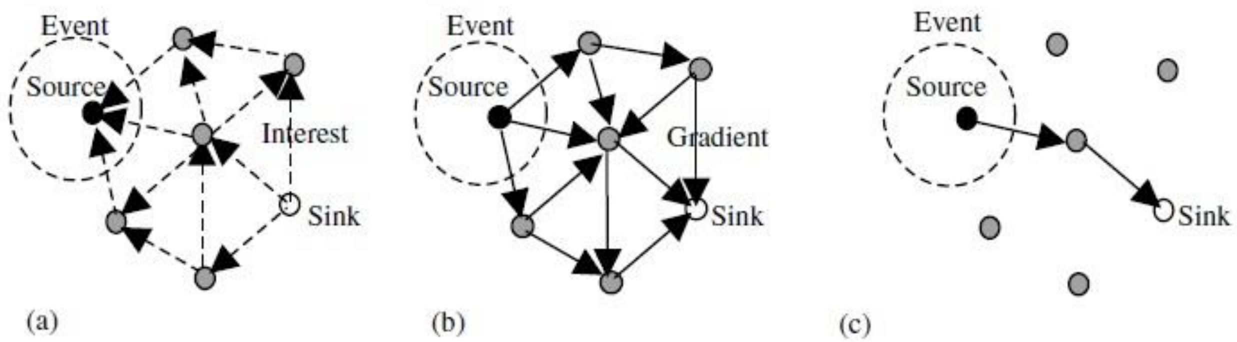
٤-٢-٣ النشر الموجه Directed Diffusion:

يعتبر النشر الموجه مرجعية في أبحاث التوجيه على البروتوكولات مركزية البيانات في شبكات الحساسات اللاسلكية. يعتمد هذا البروتوكول على فكرة نشر البيانات عبر الشبكة باستخدام مخطط تسمية للبيانات. إن السبب الرئيسي لاستخدام مخطط التسمية هو التخلص من العمليات غير الضرورية في طبقة الشبكة وذلك لتوفير استهلاك الطاقة.

اقترح هذا البروتوكول استخدام ثنائية الخاصية والقيمة لتسمية البيانات، واستعلام العقد عند الحاجة للبيانات بالاعتماد على هذه الثنائيات، ولكي يتم إنشاء استعلام يتم تعريف اهتمام (Interest) بالاعتماد على قائمة الثنائيات، مثل أسماء العناصر، المدة، المنطقة الجغرافية، الخ.... يتم تعميم الاهتمام عن طريق المصرف إلى جميع العقد في الشبكة. كل عقدة تستقبل هذا الاستعلام بإمكانها الاحتفاظ به للاستخدام اللاحق. تملك العقد أيضاً القدرة على تجميع البيانات ضمن الشبكة والتي تمت نمذجتها كشجرة Steiner الأصغرية [46].

يتم استخدام الاهتمامات المحفوظة لدى العقد وذلك لمقارنة القيم التي تصل حديثاً بالقيم الموجودة سابقاً. يحتوي الاهتمام على عدة حقول انحدار (Gradient) والذي يمكن تعريفها بأنها رابط العودة إلى الجار الذي تم استلام الاهتمام منه، ولهذا الاهتمام عدة مواصفات مثل معدّل نقل البيانات عبره، وزمن انتهاء الصلاحية الذي يرتبط بالحقول الخاصة بهذا الاهتمام. بالاعتماد على الاهتمامات والانحدارات يتم انشاء المسارات بين المصرف والمصادر في الشبكة، حيث يتم انشاء عدة مسارات بين المصرف وأحد المصادر ومن ثم يتم اختيار أحدها عن طريق التعزيز. يقوم المصرف بإرسال رسالة الاهتمام الأساسية عبر المسار الذي تم

اختياره مع فواصل زمنية أقل وبالتالي يتم تعزيز العقد الموجودة على هذا المسار، والتي بدورها تقوم بزيادة معدل إرسال البيانات ضمن واحدة الزمن.



شكل (٤-٤) بروتوكول النشر الموجه

يدعم بروتوكول النشر الموجه عمليات إصلاح المسارات، ففي حال فشل إحدى المسارات بين أحد العقد والمصرف، يتم اعتماد مسار بديل عنه، وللقيام بذلك يقوم البروتوكول ببدء عملية تعزيز جديدة، يتم خلالها البحث بين المسارات الأخرى التي يتم إرسال البيانات عبرها بمعدلات نقل أقل. إحدى التعديلات لهذا البروتوكول هي أن يتم اعتماد أكثر من مسار لنقل البيانات وذلك بشكل دائم، وفي حال فشل أحد هذه المسارات يتم الاعتماد على أحد المسارات الأخرى بدون أي كلفة زائدة للبحث عن مسارات أخرى. إن اعتماد أكثر من مسار في نفس الوقت يسبب حملاً زائداً على الشبكة للحفاظ على هذه المسارات البديلة نشطة (عن طريق ارسال البيانات عبر هذه المسارات ولكن بمعدلات نقل منخفضة...)، والذي من شأنه التسبب بزيادة استهلاك الطاقة، لكن إذا تمت مقارنة مقدار هذه الطاقة المستهلكة مع الطاقة اللازمة لإيجاد مسارات أخرى فهي أقل [56] .

يختلف النشر الموجه عن بروتوكول SPIN في الآلية التي يستخدمها للاستعلام عن البيانات عند الحاجة، ففي النشر الموجه يقوم المصرف بالاستعلام عن البيانات من العقد عن طريق الإغراق، أما بروتوكول SPIN فيعتمد على الإعلان عن أن البيانات متاحة، وهذا ما يتيح إمكانية الحصول على هذه البيانات للعقد التي لديها اهتمام بها.

يملك النشر الموجه عدة إيجابيات، فهو بروتوكول توجيه مركزي البيانات ، وهذا مايتيح إمكانية اتمام الاتصالات بين العقد المتجاورة بدون الحاجة إلى آلية لعنونة العقد. تستطيع كل عقدة القيام بتجميع البيانات والتخزين المؤقت للبيانات (Caching) بالإضافة إلى وظائف الاستشعار. يساهم التخزين المؤقت في تسريع تسليم البيانات وتقليل استهلاك الطاقة. بالإضافة إلى ما سبق، فإن النشر الموجه يعتبر من البروتوكولات التي تستهلك الطاقة بكفاءة عالية، فهو يعمل على تأمين البيانات عند طلبها وبالتالي لا توجد حاجة لتتبع التغيرات في الطبولوجيا الشاملة للشبكة.

لا يمكن استخدام بروتوكول النشر الموجه لجميع تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية، على اعتبار أنه يقوم بتسليم البيانات بناءً على استعلامات ينشرها المصرف. بعض التطبيقات تتطلب أن يتم تسليم البيانات للمصرف بشكل مستمر ودوري، وليس أن يتم تسليم البيانات بناءً على استعلامات ينشرها المصرف، وبالتالي لايمكن استخدام هذا البروتوكول في هذا النوع من التطبيقات (مثل تطبيقات مراقبة البيئة)، يضاف إلى ما سبق أن آلية التسمية المستخدمة في النشر الموجه تعتمد على نوع التطبيق.

٤-٢-٤ التوجيه المدرك للطاقة Energy aware routing:

إحدى التحسينات المقترحة من قبل Shah و Rabaey أن يتم استخدام مجموعة من المسارات المغايرة للمسار الأمثل بين الحين والآخر وذلك بهدف إطالة عمر الشبكة [53]. يتم اختيار هذه المسارات بالاعتماد على تابع احتمالي مرتبط بمقدار استهلاك الطاقة في كل مسار من المسارات. إن إطالة عمر الشبكة لأقصى حد ممكن هو المعيار الوحيد الذي يهتم هذا الاقتراح بتحسينه. تناقش هذه الطريقة أنه في حال تم استخدام المسارات التي تستهلك أقل مقدار من الطاقة بشكل مستمر فإن هذا سيؤدي إلى استنفاذ الطاقة لدى العقد المكونة لهذه المسارات. عوضاً عن ذلك يتم استخدام مسار من بين عدة مسارات بناءً على احتمال معيّن، وذلك لإطالة عمر الشبكة لأقصى حد ممكن. يفترض البروتوكول أن كل عقدة من العقد معنونة باستخدام نظام عنونة مؤلف من أكثر من فئة ويتضمن معلومات عن مواقع العقد وفئاتها. تتكون عمليات هذا البروتوكول من المراحل الثلاثة التالية:

١- **مرحلة الإعداد:** يتم الاعتماد على إغراق محلّي لإنشاء المسارات وجداول التوجيه، أثناء الإغراق تقوم كل عقدة بحساب كلفة الطاقة الكلية للمسارات. على سبيل المثال، إذا تم إرسال الطلب من العقدة N_i إلى العقدة N_j بحساب كلفة المسار كالتالي:

$$C_{N_j,N_i} = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \qquad (4.1)$$

يتضمن مقياس الطاقة المستخدم كل من مقدار الطاقة اللازمة للإرسال والاستقبال بالإضافة إلى مقدار الطاقة المتبقي لدى العقدة. يتم تجاهل المسارات التي لها كلفة عالية جداً، واختيار العقد يتم بالاعتماد على قرب هذه العقد من المصرف. تقوم العقدة بإسناد احتمالات لكل عقدة من جيرانها في جدول التوجيه، تتناسب هذه الاحتمالات عكسياً مع كلفة هذا المسار وفق المعادلة التالية:

$$P_{N_jN_i} = \frac{1/C_{N_jN_i}}{\sum_{K \in FT_j} 1/C_{N_jN_k}} \quad (4.2)$$

حيث (FT_j) هو جدول التوجيه الخاص بالعقدة (N_j)

ثم تقوم العقدة N_j بحساب الكلفة المتوسطة للوصول إلى الوجهة بالاعتماد على الجيران الموجوين في جدول التوجيه بالاعتماد على المعادلة:

$$Cost(N_j) = \sum_{i \in FT_j} P_{N_jN_i} C_{N_jN_i} (4.3)$$

يتم وضع هذه الكلفة المتوسطة ضمن حقل الكلفة في رزم البيانات، ويتم توزيعها على الجيران.

٢- **مرحلة تبادل البيانات:** تقوم كل عقدة بتسيير الرزم عن طريق عقدة مختارة من جدول التوجيه بالاعتماد على الاحتمالات.

٣- **مرحلة صيانة المسارات:** يتم إجراء عملية الإغراق المحلّي بشكل دوري بهدف الحفاظ على جميع المسارات، تشبه هذه الطريقة الآلية المعتمدة في النشر الموجه لإيجاد مسارات من المصادر إلى المصرف.

في النشر الموجه يتم إرسال البيانات عبر عدة مسارات، إحدى هذه المسارات يتم تعزيزها لتقوم بنقل البيانات بمعدلات أعلى، أما التوجيه المدرك للطاقة فيقوم باختيار مسار وحيد من بين عدة مسارات متاحة وذلك لتوفير استهلاك الطاقة. عند مقارنة هذا البروتوكول مع النشر الموجه فإنه يؤمن وفراً بمقدار ٢١.٥% في استهلاك الطاقة ويزيد عمر الشبكة بمقدار ٤٤%. إن استخدام مسار وحيد يمنع إمكانية إصلاح حالات فشل

عقدة أو مسار وذلك بخلاف النشر الموجه، بالإضافة إلى أن هذا البروتوكول يتطلب تجميع معلومات مواقع العقد وعنونة العقد وهذا من شأنه تعقيد عملية إنشاء المسارات بالمقارنة مع النشر الموجه.

٤-٢-٥ التوجيه بالإشاعات Rumor Routing:

يعتبر التوجيه بالإشاعات شكلاً آخرَ من بروتوكول النشر الموجه، مخصص للحالات التي لا تتوفر فيها معلومات عن المناطق الجغرافية في الشبكة. يقوم النشر الموجه بإغراق كامل الشبكة بالاستعلام عندما لايكون متاحاً معرفة المنطقة الجغرافية الواجب نشر الاستعلام ضمنها. في بعض الحالات يتم طلب كميات قليلة من البيانات ولذلك فإن إغراق كامل الشبكة غير ضروري. إحدى الطرق البديلة هي إغراق الشبكة بالأحداث وذلك في حال كان عدد الأحداث قليل وعدد الاستعلامات كبير. يعتبر التوجيه بالإشاعات خياراً بين إغراق الشبكة بالأحداث و إغراقها بالاستعلامات. يعتمد على فكرة توجيه الاستعلامات فقط إلى العقد التي لاحظت وقوع حدث ما عوضاً عن إغراق كامل الشبكة للحصول على بيانات عن الأحداث التي وقعت. لنشر وقوع حدث ضمن الشبكة يقوم هذا البروتوكول بالاعتماد على رزم لها فترة حياة طويلة تدعى الوكلاء. عندما تكتشف عقدة ما وقوع حدث تقوم بإضافة هذا الحدث إلى جدولها المحلّي وتقوم بتوليد وكيل. يتجول الوكلاء عبر الشبكة بهدف نشر معلومات حول الحدث إلى العقد البعيدة. عندما تقوم عقدة ما بتوليد استعلام عن حدث ما، تقوم العقد التي تعرف المسار باتجاه هذا الحدث بالاستجابة لهذا الاستعلام بالاعتماد على جدول الأحداث الخاص بالعقدة، وبالتالي يتم تجنب الكلفة اللازمة لإغراق كامل الشبكة. يحتفظ هذا البروتوكول بمسار وحيد بين المصدر والوجهة بخلاف النشر الموجه الذي يقوم بنقل البيانات عبر عدة مسارات.

أظهرت نتائج المحاكاة أن هذا البروتوكول يحقق وفراً هاماً في استهلاك الطاقة بالمقارنة مع إغراق الأحداث وبإمكانه أيضاً تجاوز فشل العقد. يكون أداء هذا البروتوكول جيداً فقط عندما يكون عدد الأحداث قليلاً أما في حال كان عدد الأحداث كبيراً فإن هناك كلفة زائدة ناتجة عن إنشاء الوكلاء والحفاظ عليهم ضمن الشبكة وإنشاء وتخزين جداول الأحداث المحلية في كل عقدة. أيضاً يتوجب الانتباه إلى ضبط الحمل الزائد المتولد عن هذا البروتوكول عن طريق ضبط المعاملات المستخدمة (فترة حياة الوكلاء لكل من الاستعلامات والأحداث، حجم جدول الأحداث المحلي).

٤-٢-٦ التوجيه المعتمد على درجة التحدّر Gradient based routing:

قدّم Schurgers نسخة معدلة من النشر الموجه [48]، وتمت تسميته التوجيه المعتمد على التحدّر (GBR Gradient based routing). يعتمد هذا البروتوكول على فكرة تقليل عدد القفزات الممكنة عند نشر اهتمام ما عبر الشبكة، وبذلك تستطيع كل عقدة اكتشاف المسار المكوّن من أقل عدد من القفزات باتجاه المصرف، والذي تمت تسميته بارتفاع العقدة. يعرّف البروتوكول التحدّر لمسار بين عقدتين على أنه الفرق بين ارتفاع العقدة الأولى وارتفاع العقدة الثانية. أثناء توجيه الرزم عبر الشبكة يتم اختيار المسار صاحب الإنحدار الأكبر. يعتمد هذا البروتوكول على استخدام تقنيات مساعدة مثل تجميع البيانات (حيث تقوم العقد التي تقوم بنقل البيانات عبر عدة مسارات بتجميع البيانات) ونشر الحركة عبر الشبكة بالإضافة إلى التوجيه بالاعتماد على التحدّر لموازنة الحركة بشكل منتظم عبر الشبكة. يستخدم البروتوكول أحد النماذج التالية لنشر الحركة:

- النموذج العشوائي: في حال وجود أكثر من عقدة مجاورة لها نفس الانحدار يتم اختيار إحدى هذه العقد بشكل عشوائي.
- النموذج المعتمد على الطاقة: عندما ينخفض مستوى الطاقة لدى العقدة دون حد معين، تقوم العقدة بزيادة ارتفاعها وهذا ما يعيق جيرانها من إرسال البيانات عبرها.
- النموذج المعتمد على التدفق: يتم حرف التدفقات الجديدة عن العقد التي تكون تكون حالياً جزءً من مسارات لتدفقات أخرى.

تسعى نماذج نشر الحركة لتحقيق توزيع عادل للحركة عبر كامل الشبكة، والذي من شأنه المساعدة في موازنة الحمل بين عقد الشبكة وبالتالي إطالة فترة حياة الشبكة. من الملاحظ أنه بالامكان الاعتماد على التقنيات المستخدمة لتوزيع الحركة عبر الشبكة وتجميع البيانات في بروتوكولات التوجيه الأخرى في شبكات الحساسات اللاسلكية لتحسين أدائها.

٤-٢-٧ توجيه النشر المقيد الغير متماثل المناحي

Constrained anisotropic diffusion routing

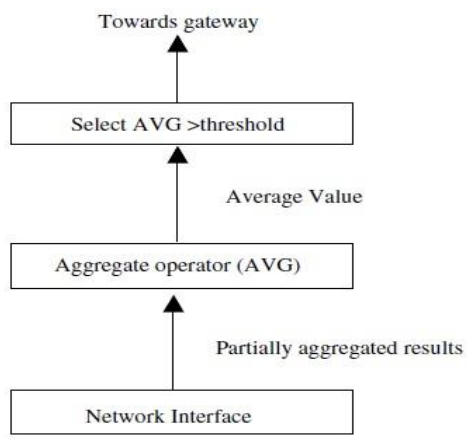
يسعى هذا البروتوكول ليكون الشكل العام للنشر الموجه [51]. يعتمد هذا البروتوكول على تقنيتي الاستعلام المقاد بالمعلومات للحساسات (IDSQ Information Driven Sensor Querying)، والنشر المقيد الغير متماثل المناحي. يعتمد هذا البروتوكول على فكرة نشر استعلامات للحساسات وتوجيه البيانات عبر الشبكة مع الوصول للحد الأقصى من الربح في المعلومات، وتقليل عطالة الشبكة، وتقليل عرض الحزمة المطلوبة. يتم تحقيق ذلك عن طريق تفعيل العقد القريبة من حدث معيّن فقط وضبط مسارات البيانات بشكل ديناميكي. إن الاختلاف الرئيسي عن النشر الموجه هو أن هذا البروتوكول يأخذ بعين الاعتبار مقدار الربح في المعلومات بالإضافة إلى كلفة الاتصال. في هذا البروتوكول تقوم العقد بمقارنة مقدار المعلومات التي ستحصل عليها مع الكلفة اللازمة للقيام بالعملية وبناءً على نتيجة هذه المقارنة وعلى متطلبات المستثمر النهائي تقوم باتخاذ قرار التوجيه. تنمذج أداة قياس الربح بالمعلومات بالاعتماد على نظرية التقدير المعيارية، يعتمد IDSQ على بروتوكول يتيح للعقدة المستعلمة أن تحدد أي العقد باستطاعتها تأمين المعلومات الأكثر أهمية مع الأخذ بعين الاعتبار مقدار الطاقة. بالرغم من أن IDSQ يؤمن آلية لاختيار الترتيب الأمثل للحسساسات للحصول على أعظم ربح تراكمي في المعلومات، إلا أنه يحدد شكل الاستعلام وآلية توجيه المعلومات عبر الشبكة باتجاه المصرف، وبالتالي يمكن النظر إليه على أنه إجراء تحسين مكمّل لعمل البروتوكول.بما أن CADR يقوم بنشر الاستعلامات بالاعتماد على قيود على مقدار المعلومات التي سيتم الحصول عليها –تحدد هذه القيود العقد التي يتوجب جلب المعلومات منها– فقد أظهرت نتائج المحاكاة أنه يحقق وفر أكثر من النشر الموجه في استهلاك الطاقة.

٤-٢-٨ بروتوكول COUGAR

هو عبارة عن بروتوكول مركزي البيانات، يعتبر أن شبكة الحساسات اللاسلكية عبارة عن قاعدة بيانات موزّعة ضخمة [47]. الفكرة الأساسية في هذا البروتوكول تتمثل في استخدام استعلامات تصريحية وذلك بهدف عزل معالجة الاستعلامات عن باقي عمليات طبقة الشبكة مثل اختيار العقدة التي تملك البيانات

المطلوبة، بالإضافة إلى استخدام تقنيات تجميع البيانات ضمن الشبكة لتوفير استهلاك الطاقة. يتم عزل معالجة الاستعلامات عن طريق طبقة استعلام جديدة تقع بين طبقة الشبكة وطبقة التطبيق.

قدّم هذا البروتوكول بنية لقاعدة بيانات الحساسات حيث تقوم العقد باختيار عقدة قائدة، تقوم العقد القائدة بمهام تجميع البيانات ونقلها إلى المصرف.



شكل (٤-٥) خطة استعلام خاصة بالعبّارة

يوضح الشكل (٤-٥) خطة استعلام من الممكن أن تعتمدها العبّارة، حسب الشكل فإن العبّارة تحصل على القراءات من باقي العقد ومن ثم تقوم بحساب متوسط هذه القراءات، في حال كانت أكبر من القيمة الحدّية يتم إرسال البيانات إلى المصرف. يقع على عاتق العبّارة توليد خطة الاستعلام، والتي تتضمن المعلومات الضرورية حول التدفقات والمعالجة ضمن الشبكة. بعد توليد هذه الخطة تقوم العبّارة بإرسالها إلى العقد المعنية ضمن الشبكة، توصّف خطة الاستعلام أيضاً آلية اختيار العقد القادة من أجل الاستعلامات. تعطي هذه البنية جميع العقد في الشبكة إمكانية إجراء معالجة على البيانات لتجميعها. هذه الإمكانية تضمن كفاءة استهلاك الطاقة وخاصة عندما يكون عدد العقد التي تولد بيانات وترسلها إلى العقد القادة كبيراً.

بالإضافة إلى ما سبق يؤمن هذا البروتوكول طبقة لاستعلام الحساسات مستقلة عن طبقة الشبكة، ولهذا النموذج بعض المساوئ منها:

- إضافة طبقة جديدة وهي طبقة الاستعلامات لكل عقدة من العقد والتي من شأنها زيادة الحمل على هذه العقد (زيادة استهلاك الطاقة، زيادة المساحة التخزينية اللازمة)

- المعالجة ضمن الشبكة للبيانات القادمة من عدة عقد تحتاج للتزامن، أي أن العقدة التي ستقوم بالمعالجة يتوجب عليها انتظار البيانات من جميع المصادر قبل أن تقوم بتجميع هذه البيانات وإرسالها إلى العقدة القائدة.
- يتطلب هذا البروتوكول وجود متابعة ديناميكية للعقد القائدة لضمان استمرارها وعدم فشلها.

٤-٢-٩ بوتوكول ACQUIRE

يقدّم هذا البروتوكول آلية جديدة لاستعلام الحساسات في شبكات الحساسات اللاسلكية، تسمية هذا البروتوكول هي مجموعة أحرف من الكلمات التالية: Active Query forwarding In sensor networks أي تسيير الاستعلام النشط في شبكات الحساسات [54]. يعتبر هذا البروتوكول أن شبكة الحساسات اللاسلكية هي عبارة عن قاعدة بيانات موزعة، ويعتبر مناسباً جداً للاستعلامات المعقدة التي تتضمن عدة استعلامات جزئية.

يعمل الاستعلام وفق الآلية التالية: يقوم المصرف بنشر الاستعلام عبر الشبكة، كل عقدة تستقبل هذا الاستعلام تحاول الإجابة على هذا الاستعلام جزئياً باستخدام المعلومات المخبّأة لديها ومن ثم تقوم بإرسال هذا الاستعلام إلى العقد الأخرى. في حال كانت البيانات المخبأة لدى العقدة غير صالحة في الوقت الحالي، تقوم العقدة بتجميع المعلومات من جيرانها الذين يبتعدون عنها مسافة من رتبة (d) قفزة. حالما يتم الإجابة عن الاستعلام بشكل كامل، يتم إرسالها إلى المصرف باستخدام المسار المعاكس الذي انتشر عبره الاستعلام، أو باستخدام المسار الأقصر باتجاه المصرف.

إن الدافع الرئيسي وراء تصميم هذا البروتوكول هو التعامل مع الحالات التي تتضمن طلب استعلام معقّد لمرة واحدة فقط، والبيانات اللازمة لهذا الاستعلام متوفرة لدى عدة عقد. تقوم بروتوكولات التوجيه مركزية البيانات باستخدام الإغراق لنشر الاستعلامات عبر الشبكة وذلك من أجل استعلامات متكررة، من غير المنطقي استخدام نفس الآلية للحالات التي يكون لدينا استعلام وحيد معقّد، وذلك بسبب الاعتبارات المتعلقة باستهلاك الطاقة. يؤمن هذا البروتوكول استعلاماً بطريقة فعّالة عن طريق ضبط قيمة المعامل (d)، وتجدر الإشارة إلى أنه في حال كانت قيمة (d) تساوي عدد عقد الشبكة، فإن سلوك هذا البروتوكول يكون مشابهاً

لسلوك الإغراق. من جانب آخر، إذا كانت قيمة (d) صغيرة فهذا يفرض أن يتم نقل الاستعلام عدداً كبيراً من المرات عبر الشبكة. تم في هذا البروتوكول معالجة مشكلة اختيار العقدة التالية لإرسال البيانات إليها، والتي تمت دراستها في بروتوكول CADR [51] وبروتوكول التوجيه بالإشاعات [50]، ففي CADR، تعتمد العقد على آلية IDSQ لمعرفة أي العقد لديها الإمكانية لتوفير أكبر قدر من البيانات المفيدة بالاعتماد على نظرية التقدير. أما التوجيه بالإشاعات فيحاول إرسال الاستعلام إلى العقد التي تكون على علم بالمسار إلى الحدث المطلوب، وذلك باعتبار أن العقد أصبحت على معرفة بالأحداث بالاعتماد على وكلاء الأحداث. أما فيACQUIRE فإن اختيار العقدة التالية يتم إما بشكل عشوائي أو يتم اختيار العقدة التي لديها أكبر قيمة لاحتمال الإجابة على الاستعلام [54].

٤-٣ البروتوكولات الهرمية Hierarchical Protocols:

كما في باقي شبكات الاتصالات، تعتبر قدرة شبكة الحساسات اللاسلكية على التوسع إحدى الخصائص الاساسية لتصميم هذه الشبكات. الشبكة التي تتكون من طبقة واحدة يمكن أن تسبب حملاً زائداً على العبّارة مع ازدياد كثافة العقد في الشبكة. ومن شأن هذا الحمل الزائد أن يسبب عطالة في الاتصالات وتتبع للأحداث لايفي بالشروط المرجوة من الشبكة. بالإضافة إلى ذلك، فإن البنية التي تعتمد على عبّارة وحيدة هي بنية غير قابلة للتوسع لتشمل عدداً كبيراً من الحساسات التي تغطي المنطقة المستهدفة، وذلك على اعتبار أن الحساسات بشكل عام ليس لها القدرة على دعم الاتصالات لمسافات بعيدة (Long haul communication). لكي تستطيع الشبكة تحمل مزيد من أحمال الحركة ولكي تستطيع تغطية المنطقة المستهدفة من دون أي انخفاض في مستوى الخدمة، فقد سعت بعض بروتوكولات التوجيه لاستخدم العنقدة.

إن الهدف الرئيسي للتوجيه الهرمي هو تحقيق كفاءة عالية في استهلاك الطاقة ضمن العقد وذلك بالاعتماد على إشراك هذه العقد باتصال متعدد القفزات ضمن عنقود محدّد، وتنفيذ عمليات تجميع وتنعيم البيانات وذلك بهدف تقليل عدد الرسائل المرسلة إلى المصرف. يتم إنشاء العناقيد بشكل تقليدي بالاعتماد على مقدار الطاقة المتوفرة لدى العقدة وقرب العقدة من رأس العنقود [58,57]. يعتبر بروتوكول LEACH [42] أحد أول بروتوكولات التوجيه الهرمية في شبكات الحساسات اللاسلكية. بالاعتماد على المبدأ الذي اعتمده

بروتوكول LEACH تم استيحاء عدة بروتوكولات توجيه [52, 43, 44, 59]، بالإضافة إلى تصميم بعض البروتوكولات الأخرى بشكل مستقل [40, 41].

٤-٣-١ بروتوكول LEACH:

بنية العنقدة المتكيفة منخفضة الطاقة Low–Energy Adaptive Clustering Hierarchy أو ما يعرف بـ LEACH [42]، يعتبر هذا البروتوكول من أكثر بروتوكولات التوجيه الهرمية انتشاراً في شبكات الحساسات اللاسلكية. يتم انشاء عناقيد من الحساسات بالاعتماد على قوة الإشارة المستقبلة، ومن ثم استخدام رؤوس العناقيد المحلية كموجهات إلى المصرف. من شأن هذه الآلية أن توفر استهلاك الطاقة على اعتبار أن عمليات الإرسال باتجاه المصرف سوف تتم فقط عن طريق رؤوس العناقيد المحلية وليس عن طريق جميع عقد الشبكة. العدد الأمثل لرؤوس العناقيد تقريباً ٥% من العدد الكلي للعقد ضمن الشبكة.

تتم جميع عمليات معالجة البيانات مثل تجميع و تنعيم البيانات بشكل محلّي ضمن كل عنقود. يتم تغيير رؤوس العناقيد بشكل عشوائي مع مرور الزمن وذلك بهدف موازنة استهلاك الطاقة بين العقد. يتم اتخاذ القرار من قبل العقدة عن طريق اختيار رقم عشوائي بين (٠) و (١)، تصبح العقدة رأس عنقود للمرحلة الحالية إذا كان الرقم أقل من العتبة التالية:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod 1/_P)} & if\ n \in G, \\ 0 & Otherwise \end{cases} \quad (4.4)$$

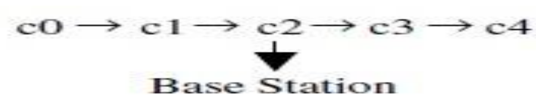
حيث P هي نسبة رؤوس العناقيد من العدد الكلّي للعناقيد (على سبيل المثال ٠.٠٥)، r هي المرحلة الحالية، G مجموعة العقد التي لم تكن رؤوس عناقيد في المراحل $\frac{1}{P}$ السابقة.

بيّنت نتائج المحاكاة أن بروتوكول LEACH يحقق وفراً في استهلاك الطاقة بالمقارنة مع النشر الموجه [42]. تموت العقد بشكل عشوائي نتيجة نفاد طاقتها، تؤمن العنقدة الديناميكية زيادة حياة الشبكة ككل. يعتبر بروتوكول LEACH موّزع بشكل كامل ولا يتطلب معرفة عامة عن الشبكة. لا بدّ من الإشارة إلى أن بروتوكول LEACH يعتمد على التوجيه بقفزة واحدة، حيث يتطلب أن تقوم كل عقدة ضمن العنقود بالإرسال مباشرة إلى رأس العنقود، وأن تكون العقدة رأس العنقود قادرة على الإرسال باتصال مباشر إلى المصرف.

لهذه الأسباب لا يمكن استخدام هذا البروتوكول في الشبكات المستخدمة في مناطق واسعة جداً. أيضاً فإن فكرة العنقدة الديناميكية تسبب حملاً زائداً ناتجاً عن تغيير رؤوس العناقيد والرسائل المتبادلة بين العقد لتنفيذ ذلك، والذي من شأنه تقليل الربح الذي يحققه هذا البروتوكول في استهلاك الطاقة.

٤-٣-٢ بروتوكولي PEGASIS و Hierarchical PEGASIS

الجمع الفعّال طاقياً في نظم معلومات الحساسات Power Efficient Gathering in Sensor Information System أو PEGASIS [43]، هو عبارة عن بروتوكول توجيه هرمي، يعتبر تطويراً لبروتوكول LEACH. بخلاف بروتوكول LEACH الذي يقوم بتشكيل العناقيد، يقوم بروتوكول PEGASIS بتشكيل سلاسل من العقد بحيث كل عقدة ترسل البيانات إلى أحد جيرانها أو تستقبل هذه البيانات من أحد جيرانها. يتم اختيار عقدة وحيدة من هذه السلسلة لتقوم بالإرسال إلى المصرف. تنتقل المعلومات من عقدة لعقدة، وخلال هذا الانتقال يتم تجميع البيانات وبالنهاية يتم إرسالها إلى المصرف. يتم تشكيل السلاسل بطريقة طامعة (Greedy) كما هو موضح بالشكل (٤-٦).



شكل (٤-٦) تشكيل السلاسل في بروتوكول PEGASIS

تقوم العقدة C0 بإرسال بياناتها إلى العقدة C1. تقوم العقدة C1 بتجميع بياناتها مع البيانات القادمة من C0 ومن ثم تقوم بإرسالها إلى العقدة القائدة. تقوم العقدة القائدة بإعطاء الأمر لباقي العقد ببدء الإرسال عن طريق علّامة (Token) يتم إرسالها إلى جميع العقد. تقوم العقدة C4 بعد استقبالها علّامة الإرسال من العقدة القائدة بإرسال بياناتها إلى العقدة C3 والتي بدورها تقوم بتجميع بياناتها مع بيانات العقدة C4 ومن ثم تقوم بإرسالها إلى العقدة القائدة. تنتظر العقدة C2 وصول البيانات إليها من جارتيها C1 و C3، وعند وصول هذه البيانات تقوم بتجميعها مع بياناتها وبالنهاية تقوم العقدة القائدة بإرسال رسالة وحيدة تحوي بيانات السلسلة إلى المصرف.

يختلف هذا البروتوكول عن بروتوكول LEACH في أنه يستخدم التوجيه عبر عدة قفزات من خلال اعتماده على السلاسل والاعتماد على عقدة وحيدة لإرسال البيانات عوضاً عن استخدام عدة عقد. أوضحت النتائج أن بروتوكول PEGASIS يحقق أداءً أفضل من بروتوكول LEACH في شبكات ذات حجوم وطبولوجيا مختلفة. يعود سبب هذه الأفضلية في الأداء لكون بوتوكول PEGASIS يتخلص من الحمل الزائد الذي يسببه التشكيل الديناميكي للعناقيد المستخدم في بروتوكول LEACH، وينتج أيضاً عن تقليل عدد عمليات الإرسال والاستقبال باستخدام تقنيات تجميع البيانات. غير أن بروتوكول PEGASIS يسبب تأخيراً زائداً للعقد البعيدة ضمن السلسلة، بالإضافة إلى أن العقدة القائدة الوحيدة من الممكن أن تصبح نقطة اختناق. لذلك تم تطوير بوتوكول PEGASIS الهرمي والذي يهدف إلى تقليل التأخير الحاصل للرزم أثناء إرسالها إلى المصرف، ويقدّم حلاً لمشكلة جمع البيانات بأخذ جداء الطاقة والتأخير كمقياس بعين الاعتبار. لكي يتم تقليل التأخير يسعى هذا البروتوكول لتمكين الإرسال المتزامن لرسائل البيانات، ولتجنب التصادمات واحتمال تداخل الإشارة بين الحساسات يعتمد هذا البروتوكول على طريقتين، الأولى تستخدم ترميز للإشارة مثل CDMA. أما في الطريقة الثانية فيتم السماح فقط للعقد المتباعدة التي لا تتداخل إشارتها بالإرسال في نفس الوقت.

إن نسخة هذا البروتوكول التي تستخدم عقد لديها إمكانية استخدام ترميز الإشارة مثل CDMA، تقوم بإنشاء سلسلة من العقد المنظّمة ضمن هرمية كشجرة، وكل عقدة رئيسة ضمن طبقة محدّدة تقوم بإرسال البيانات إلى العقدة الرئيسة في الطبقة التالية. تضمن هذه الآلية إرسال البيانات بشكلٍ متوازٍ (تفرعي) وبالتالي تقليل التأخير بشكل كبير، وباعتبار أن الشجرة متوازنة فإن التأخير سيكون من مرتبة $O(\log N)$ حيث N هو العدد الكلي للعقد.

BS

↑

c3

c3 ← c7

c1 → c3 → c5 → c7

c0 → c1 c2 → c3 c4 → c5 c6 → c7

شكل (٤-٧) تجميع البيانات ضمن السلاسل

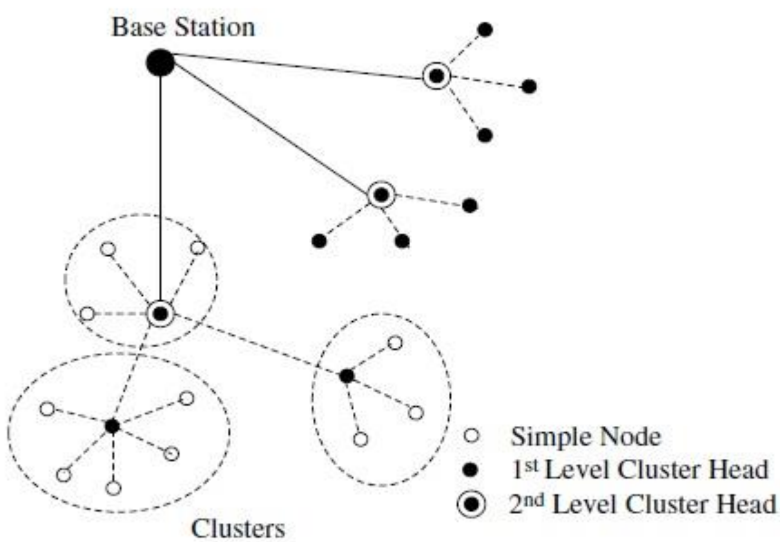
على سبيل المثال يوضح الشكل (٤-٧) آلية تجميع البيانات. العقدة $C3$ هي العقدة المختارة لتكون رئيسة للمرحلة الأخيرة (المرحلة ٣ في هذه الحالة). على اعتبار العقدة C3 موجودة في الموقع ٣ (بدء العد من جهة اليسار ابتداءً من الصفر) ضمن السلسلة، كل العقد الموجودة في مواقع زوجية ستقوم بالإرسال إلى جارها الأيمن. العقد التي تستقبل بيانات في كل مرحلة ترتفع إلى المرحلة التالية ضمن الهرمية. في المرحلة التالية العقدة C3 لا تزال في موقع فردي وهو ١، وبالتالي كل العقد الموجودة في مواقع زوجية ستقوم بتجميع بياناتها مع البيانات التي استقبلتها ومن ثم إرسالها إلى جارها الأيمن. في المرحلة الثالثة والأخيرة، العقدة C3 في موقع زوجي ولكنها هي العقدة المختارة كرئيس، بالتالي تقوم العقدة C7 بتجميع بياناتها مع البيانات التي استقبلتها ومن ثم تقوم بإرسالها إلى العقدة $C3$. في النهاية تقوم العقدة $C3$ بدمج بياناتها مع البيانات المستقبلة من $C7$ ومن ثم إرسال الرسالة إلى المصرف.

نسخة هذا البروتوكول التي لا تعتمد على ترميز الإشارة تقوم بإنشاء هرمية من ثلاث طبقات، ويتم التقليل من أثر تداخل الإشارة من خلال الجدولة الدقيقة لعمليات الإرسال المتزامنة.

بالرغم من أن بروتوكول PEGASIS يتجنب الحمل الزائد الناتج عن التشكيل الديناميكي للعناقيد والمستخدم في بروتوكول LEACH، لكنه يحتاج إلى ضبط ديناميكي للطبولوجيا على اعتبار أن طاقة العقد لايتم أخذها بعين الاعتبار، على سبيل المثال، كل عقدة يجب أن تكون على دراية بحالة جيرانها لكي تستطيع اتخاذ قرار إلى أي من هذه العقد يجب أن ترسل بياناتها. هذا الضبط الآلي للطبولوجيا من الممكن أن يسبب حملاً زائداً كبيراً وخاصة في الشبكات عالية الاستخدام.

٤-٣-٣ بروتوكولي TEEN و APTEEN

بروتوكول شبكات الحساسات الحساس للعتبة والكفؤ في استهلاك الطاقة Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol أو TEEN [52]، هو عبارة عن بروتوكول هرمي تم تصميمه ليكون سريع الاستجابة للتغيرات المفاجئة في المعاملات التي تراقبها شبكة الحساسات مثل درجة الحرارة والضغط. إن الاستجابة السريعة هامة جداً للتطبيقات التي تخضع لقيود زمنية حرجة. في هذا النوع من التطبيقات يكون نمط عمل الشبكة تفاعلياً. يسعى هذ البروتوكول لتحقيق الهرمية بالإضافة إلى استخدامه لتقنيات مركزية البيانات. ينظّم هذا البروتوكول العقد ضمن الشبكة باستخدام بنية هرمية تعتمد على تجميع العقد المتقاربة مع بعضها البعض لتشكيل عنقود درجة أولى، ومن ثم تجميع رؤوس العناقيد المتقاربة لتشكيل عنقود درجة ثانية، وتستمر هذه العملية لحين الوصول إلى المصرف كما هو موضح بالشكل (٤-٨).



شكل (٤-٨) العنقدة الهرمية

بعد تشكيل العناقيد تقوم رؤوس العناقيد بتعميم عتبتين للعقد ضمن العنقود، وهما العتبة القاسية والضعيفة (Soft and hard) لكل معامل من معاملات الوسط التي تراقبها هذه الحساسات. وتعرّف العتبة القاسية بأنها أقل قيمة ممكنة لمعامل الوسط والتي تفرض على العقدة الحساسة تشغيل مرسلها اللاسلكي وإرسال هذه المعلومة إلى رأس العنقود. تتضح أهمية هذه العتبة من خلال تقليل عمليات الإرسال التي تقوم بها العقد إلى العقدة رأس العنقود من خلال فرضها أن تكون القياسات الجديدة ضمن مجال اهتمام العقدة رأس العنقود.

حالما تستشعر أي عقدة ضمن العنقود أحد معاملات الوسط بقيمة تساوي أو أكبر من العتبة القاسية، تقوم بإرسال هذه البيانات فقط إذا كان مقدار التغير في قيمة المعامل أكبر أو يساوي العتبة الضعيفة. كنتيجة لذلك فإن العتبة الضعيفة تعمل على زيادة التقليل من الرسائل المرسلة إلى رأس العنقود من خلال منع العقد الحساسة من إرسال بيانات مكررّة أو بيانات تحتوي تغيرات غير هامة في قيم المعاملات.

من خلال ضبط قيمتي هاتين العتبتين نستطيع التحكم بعدد الرزم التي سيتم إرسالها عبر الشبكة. غير أن بروتوكول TEEN لا يلائم التطبيقات التي تحتاج إلى تقارير دورية، فمن الممكن أن لا يحصل المستخدم على أية معلومة طالما أن قيم المعاملات التي يتم مراقبتها لم تصل إلى العتبتين التي تم وضعهما.

بروتوكول شبكات الحساسات المتكيّف والحساس للعتبة والكفؤ في استهلاك الطاقة The Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocolأو APTEEN، هو عبارة عن تطوير لبروتوكول TEEN [59]، يسعى لتأمين بيانات دورية عن الوسط قيد المراقبة والتفاعل مع الأحداث ضمن بيئة تخضع لشروط زمنية حرجة. يستخدم هذا البروتوكول نفس البنية الهرمية التي يستخدمها بروتوكول TEEN. عندما يقوم المصرف بإنشاء العناقيد، تقوم العقد رؤوس العناقيد بتعميم المعاملات التي يتوجب على العقد قياسها والعتبتين القاسية والضعيفة بالإضافة إلى الجدولة الخاصة بكل العقد. تقوم العقد رؤوس العناقيد بتجميع البيانات وذلك بهدف توفير استهلاك الطاقة. يدعم هذا البروتوكول ثلاثة أنواع مختلفة من الاستعلامات:

- الاستعلامات التاريخيةHistoric: لتحليل القيم القديمة لمعاملات الوسط.
- الاستعلام عن قيم قديمة محددة One–Time: لأخذ صورة عن حالة الشبكة في لحظة زمنية ما.
- الاستعلامات المستمرة Persistent: لمراقبة الأحداث لفترة زمنية معينة.

أظهرت نتائج المحاكاة تفوق كل من بروتوكولي TEEN و APTEEN على بروتوكول LEACH [42]، كما أظهرت التجارب أن أداء APTEEN يقع بين أدائي البروتوكولين TEEN و LEACH من حيث استهلاك الطاقة وعمر الشبكة. حقق بروتوكول TEEN أفضل أداء على اعتبار أنه يقلل من عمليات الإرسال. ما يعيب كلا البروتوكولين هو العبء الزائد الناتج عن تشكيل العناقيد على عدة مستويات.

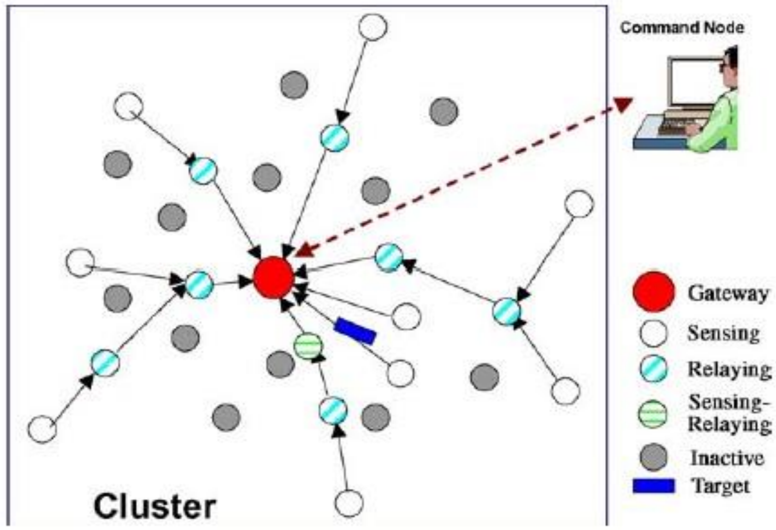
٤-٣-٤ التوجيه المدرك للطاقة

Energy-aware routing for cluster based sensor network

قدّم Younis خوارزمية توجيه هرمية تعتمد على بنية مؤلفة من ثلاث طبقات [41]. في هذه الخوارزمية يتم تجميع العقد ضمن عناقيد قبل بدء عمليات الشبكة. تستخدم هذه الخوارزمية رؤوس العناقيد وتسميها عبارات. تتمتع هذه العبارات بقيود طاقية أقل، وتكون هذه العبارات على علم بمواقع العقد التي تنتمي إلى العنقود المسؤولة عنه.تقوم العبارات بتتبع حالات جميع العقد الموجودة ضمن العنقود وتقوم بإنشاء مسارات متعددة القفزات لجمع البيانات من هذه العقد. تعتمد العقد ضمن العنقود على طريقة TDMA كآلية للتحكم بالوصول إلى الوسط (MAC) وذلك بهدف إرسال البيانات إلى العبارات. تُعلم العبارة كل عقدة من العقد بالشريحة الزمنية التي يتوجب عليها الإرسال ضمنها والشرائح الزمنية التي يتوجب عليها الاستماع خلالها إلى إرسال باقي العقد، و يتخاطب المصرف فقط مع العبارات.

تفترض هذه الخوارزمية أن العقد لديها القدرة على العمل ضمن النمط الفعّال أو نمط التأهب (Stand by) والذي يساهم في توفير استهلاك الطاقة، بالإضافة لقدرة هذه العقد على إيقاف تشغيل دارات استشعار الوسط ودارات المعالجة، يضاف إلى ذلك قدرة العقد على إيقاف تشغيل/ تشغيل كل من المرسل والمستقبل اللاسلكي بشكل منفصل، و القدرة على التحكم بمقدار الطاقة المستخدمة للإرسال بناءً على المدى الواجب أن يصل إليه هذا الإرسال. يمكن أن تكون العقد ضمن العناقيد في إحدى الحالات التالية:

- حالة الاستشعار فقط: في هذا النمط تقوم العقد بفحص الوسط وتوليد بيانات بمعدّل ثابت.
- حالة إعادة البث: في هذه الحالة لا تقوم العقدة بفحص الوسط ولكن تقوم بتشغيل دارات الاتصالات لديها لإعادة بث البيانات من باقي العقد التي تستشعر الوسط.
- حالة الاستشعار وإعادة البث: في هذه الحالة تقوم العقدة بالمهمتين: استشعار الوسط وتوليد البيانات بالإضافة إلى إعادة بث بيانات العقد الأخرى.
- الحالة غير الفعّالة: تقوم العقدة بإيقاف تشغيل دارات الاتصالات والاستشعار لديها.



شكل (٤–٩) بنية العنقود

يوضح الشكل (٤–٩) حالات العقد والمسارات في عنقود تقليدي ضمن تطبيق متابعة الأهداف. تعرّف هذه الخوارزمية أيضاً تابع كلفة بين أي عقدتين تملكان اتصالاً مباشراً، يراعي هذا التابع استهلاك الطاقة بالإضافة إلى التأخير الزمني في تسلم الرزم وغيرهما من معايير الأداء. بالاعتماد على هذا التابع يتم تحديد كلفة الرابط بين العقدتين، ومن ثم يتم اختيار المسار صاحب الكلفة الأقل بين العقد والعبّارة. تقوم العبّارة بمراقبة مستوى الطاقة المتاح في كل العقد الفعّالة بشكل مستمر. يتم البدء بإعادة التوجيه بناءً على حدث يرتبط بالتطبيق ويتطلب أن تقوم عقد مغايرة للعقد الحالية باستشعار الوسط، أو في حال خروج عقدة فعّالة من الشبكة لنفاد مصادر الطاقة لديها.

شكل آخر من هذه الخوارزمية تم اقتراحه في [60]. تقوم الخوارزمية بتقييد مدى الإرسال الأدنى وذلك بهدف التقليل من التأخير الزمني، أظهرت نتائج المحاكاة أن هذه الخوارزمية تحقق أداءً جيداً وثابتاً فيما يتعلق بالمقاييس المرتبطة بالطاقة مثل فترة حياة الشبكة، بالإضافة لمحافظتها على ذلك الأداء الجيد فيما يتعلق بالمقاييس الأخرى مثل الإنتاجية والتأخير.أظهرت النتائج أيضاً أن استخدام هذه الخوارزمية للتوجيه مضافاً إليها آلية لضبط الوصول للوسط يزيد من فترة حياة الشبكة. غير أن هذه الخوارزمية تتطلب نشر عدد كبير من العبارات لضمان تغطية جميع العقد بعبّارات، وقد تم تجاوز هذه المشكلة في نسخة أخرى من الخوارزمية

[61]، حيث تمت إضافة طبقة أخرى للشبكة، تعمل هذه الطبقة على ربط العقد التي لايمكن الوصول إليها بعقدة وكيلة تقوم بنقل الأوامر من العبارة باتجاه هذه العقد، وتنقل البيانات وحالة العقدة باتجاه العبّارة.

٤-٣-٥ بروتوكول التنظيم الذاتي Self-organizing protocol

قدّم كل من Subramanian و Katz في [40] توصيفاً لبروتوكول التنظيم الذاتي بالإضافة إلى تصنيف لتطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية. بالاعتماد على هذا التصنيف تم اقتراح المكونات البنيوية والمكونات التي تتعلق بالبنية التحتية الضرورية لبناء هذه التطبيقات. تدعم هذه البنية العقد الهجينة المتحركة أو الثابتة. تقوم بعض العقد والتي من الممكن أن تكون ثابتة أو متحركة بفحص الوسط المستهدف و إرسال البيانات إلى مجموعة محددة من العقد التي تلعب دور الموجهات. العقد الموجهة هي عبارة عن عقد ثابتة وتشكل العمود الفقري للاتصالات. تقوم العقد الموجهة بتوجيه البيانات إلى عقد أخرى هي المصارف. ولكي تكون العقدة جزء من الشبكة، يجب أن تستطيع عقدة موجهة واحدة على الأقل الوصول إليها.

تتطلب هذه البنية أن يتم عنونة كل عقدة من العقد، ويتم تحديد العقد التي تستشعر الوسط عن طريق عنوان العقدة الموجهة التي تتصل مع هذه العقدة. تعتبر هذه البنية هرمية، على اعتبار أنها تقوم بتشكيل مجموعة من العقد مع إمكانية دمج هذه المجموعات عند الحاجة، ولدعم التسامح مع الأخطاء تم الاعتماد على خوارزمية حلقات ماركوف المحلية (Local Markov Loop LML) – التي تقوم بتنفيذ تجوّل عشوائي على أشجار العبور ضمن الرسم البياني Graph– لنشر التعاميم. يتألف عمل الخوارزمية من المراحل التالية:

- مرحلة الاستكشاف: تقوم كل عقدة باكتشاف العقد المجاورة لها في هذه المرحلة.
- مرحلة التنظيم: يتم تشكيل المجموعات ودمجها لتشكيل هرمية. يتم إعطاء عنوان لكل عقدة بناءً على موقعها ضمن الهرمية ومن ثم يتم إنشاء جداول توجيه من رتبة $O(\log N)$ في كل عقدة من العقد، وفي النهاية يتم إنشاء أشجار تعميم تمتد على جميع العقد.
- مرحلة الصيانة: يتم في هذه المرحلة تحديث جداول التوجيه ومستويات الطاقة المتوفرة لدى العقد. حيث تتبادل العقد مع بعضها تغيرات جداول التوجيه ومستويات الطاقة الجديدة المتوفرة لديها. ويتم الاعتماد على LML من أجل صيانة أشجار التعاميم.

- مرحلة التنظيم الذاتي: في حال انقسام الشبكة أو خروج بعض العقد من الشبكة يتم تنفيذ عملية إعادة تنظيم للمجموعات.

تستخدم هذه الخوارزمية العقد الموجهة لإبقاء جميع العقد متصلة عن طريق إنشاء مجموعات سيطرة، تشابه هذه الطريقة الطريقة المعتمدة في بروتوكول GAF والتي تسمى الشبكات الافتراضية (Virtual Grid) [62] والتي سيتم التطرق إلها لاحقاً ضمن بروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع. إن الفائدة الرئيسية من استخدام هذه الخوارزمية تكمن في الكلفة المنخفضة للحفاظ على جداول التوجيه وإبقاء البنية الخاصة بالتوجيه متوازنة بدقة. إن كلفة تعميم الرسائل عبر هذه الخوارزمية أقل من كلفة التعميم في بروتوكول SPIN [49] وذلك بسبب الاعتماد على LML لإنشاء أشجار التعميم والتي تؤمن أيضاً سماحية للأخطاء. السيئة في هذه الخوارزمية تكمن في مرحلة التنظيم، التي تسبب حملاً زائداً إضافياً، وفي حال وجود انقطاعات كثيرة في الشبكة تقوم الخوارزمية بتكرار عمليات إعادة التنظيم مما يؤدي إلى أحمال زائدة على الشبكة.

٤-٤ بروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع

يعتبر تصميم بروتوكول توجيه فعّال وقابل للتوسع في شبكات الحساسات اللاسلكية من أهم التحديات التي تواجه هذه الشبكات، وذلك بسبب محدودية موارد عقد هذه الشبكات والعدد الكبير لها والتغيرات الكثيرة التي تطرأ على طبولوجيا هذه الشبكات. تم اقتراح الاستفادة من معلومات مواقع العقد في عمليات التوجيه وذلك بهدف تحقيق قابلية عالية للتوسع. يتم في هذه البروتوكولات عنونة العقد باستخدام مواقعها. تمتاز هذه البروتوكولات بأن عملياتها محلّية تشمل فقط العقدة وجيرانها المباشرين الذين يقعون ضمن مدى إرسالها. لذلك فإن المعلومات التي يجب على كل عقدة حفظها عن الشبكة تكون ضمن حدها الأدنى مما يقلل من الحمل الزائد الذي تسببه هذه البروتوكولات. بالإضافة لقدرتها على الاستجابة السريعة للتغيرات على طبولوجيا الشبكة.

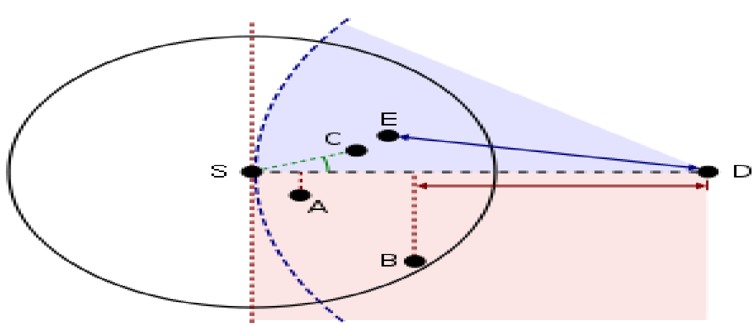
في التوجيه الجغرافي تكون كل عقدة على دراية بموقعها وموقع المصرف و مواقع جيرانها المباشرين بالاعتماد على آلية تحديد مواقع (تم مناقشتها ضمن الفصل السابق). تقوم العقدة المصدر بإضافة موقع العقدة الوجهة إلى كل رزمة من الرزم. أثناء تسيير الرزمة عبر الشبكة ، تعتمد كل عقدة على معلومات

مواقع جيرانها ومعلومات موقع المصرف لاختيار إحدى العقد الجارة كعقدة تالية ضمن المسار باتجاه المصرف ليتم إرسال الرزمة إليها. يمكن أن يتم إرسال هذه الرزمة إلى عقدة وحيدة أو إلى عدة عقد. يعتبر الإرسال إلى عدة عقد أكثر متانة ويؤدي إلى وجود عدة مسارات لنفس الرزمة باتجاه المصرف، ولكن يؤدي أيضاً إلى استهلاك مزيد من موارد العقد، لذلك فإن الإرسال إلى عقدة وحيدة يعتبر أكثر فعّالية من حيث استهلاك الموارد وهو الأكثر استخداماً في بروتوكولات التوجيه.

إن المكوّن الأساسي في التوجيه الجغرافي هو خوارزمية الإرسال الطامع (Greedy Forwarding) والتي تفرض أن تحقق الرزمة تقدّم باتجاه الوجهة في كل خطوة عبر المسار الذي تسلكه. لتحقيق ذلك تقوم كل عقدة بتسليم الرزمة إلى أحد جيرانها الأقرب منها إلى المصرف حتى تصل هذه الرزمة إلى المصرف. في حال كانت معلومات مواقع العقد صحيحة فإن المسارات التي تسلكها الرزم تكون خالية من الحلقات.

٤-٤-١ خوارزمية التقدم الطامع Greedy Forwarding:

في هذه الخوارزمية تتخذ العقدة قراراً حول المسار الواجب على الرزمة اتباعه بناءً على معلومات مواقع جيرانها و موقع الوجهة، ولتحقيق التقدّم باتجاه المصرف، تقارن العقدة موقع العقدة المصرف مع مواقع جيرانها ومن ثم تقوم بإرسال الرزمة باتجاه الجار الأقرب إلى المصرف. يتم تكرار العملية لحين وصول الرزمة إلى المصرف.يوجد عدة مقاييس تتعلق بمفهوم القرب (Closeness) تم اقتراحها في هذا السياق ، أشهر هذه المقاييس هي المسافة الإقليدية (بين نقطتين في المستوي) والخط الواصل بين العقدة الحالية والمصرف كما هو موضح بالشكل (٤-١٠).

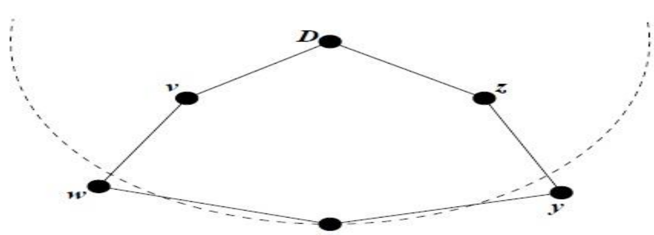


شكل (٤-١٠) خوارزمية التقدم الطامع

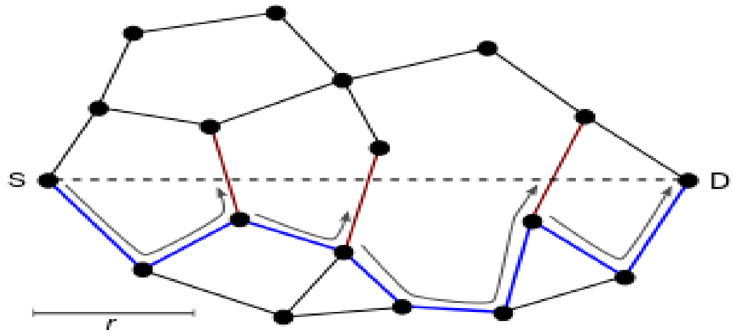
تكون عملية الإغراق في هذه الخوارزمية محصورة بقفزة واحدة مما يتيح للشبكة القابلية للتكيف مع التغيرات في الطبولوجيا بشكل فعال. تم تطوير هذه الآلية البسيطة لتسيير الرزم في [63] بناء على وثوقية الوصلات بين العقد، فلم يتم أخذ الجيران غير الموثوقين بعين الاعتبار. من الاستراتجيات المتبعة في اختيار العقدة التالية في هذه الخوارزمية :

- التقدم الأكبر وفق مدى الإرسال الحالي Most Forward Within R: يتم في هذه الاستراتيجية اختيار الجار الأبعد عن العقدة الحالية والأقرب منها إلى المصرف ، ذلك بهدف التقليل من عدد القفزات وتقليل التأخير الزمني الحاصل في تسليم الرزم [64]. حسب الشكل (٤-١٠) تختار هذه الاستراتيجية العقدة (B) كعقدة تالية.
- عملية التسيير الأقرب Nearest Forward Process: يتم في هذه الإستراتيجية اختيار العقدة الأقرب إلى العقدة الحالية والتي تحقق تقدما اتجاه المصرف بهدف التقليل من استهلاك الطاقة وتجنب أثر الأخطاء في مواقع العقد والأخطاء الناتجة عن قنوات الاتصال اللاسلكية. حسب الشكل (٤-١٠) تختار هذه الاستراتيجية العقدة (A) كعقدة تالية.

إن المحدودية الأساسية لهذه الخوارزمية تتمثل باحتمال فشل عملية الإرسال عندما لا يوجد أي جار للعقدة أقرب منها إلى المصرف كما هو موضح بالشكل (٤-١١)، حيث لا تستطيع العقدة x إرسال البيانات إلى المصرف كونها أقرب للمصرف من جميع جيرانها.

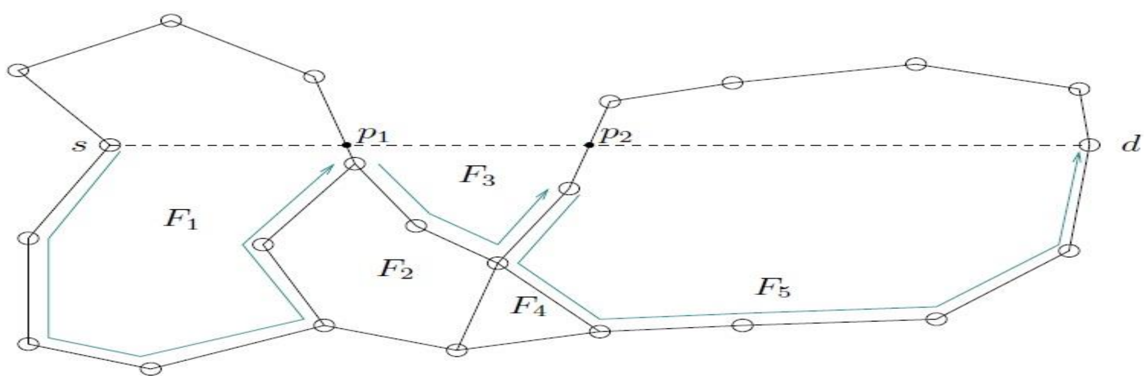


شكل (٤-١١) فشل خوارزمية التقدم الطامع



شكل (٤–١٢) خوارزمية التوجيه الوجهي

للخروج من هذه الحالة، تعتمد هذه الخوارزمية على خوارزمية التوجيه الوجهي Face Routing كاستراتيجية استعادة لضمان تسليم الرزم إلى الوجهة. كما هو موضح بالشكل (٤–١٢)، إن الفكرة الأساسية التي يعتمد عليها التوجيه الوجهي هي توجيه الرزمة داخل الأوجه التي تتقاطع مع الخط الواصل بين المصدر والوجهة. يتم العبور داخل الوجه عن طريق تطبيق قاعدة اليد اليمنى (أو قاعدة اليد اليسرى). بمعنى آخر يتم إرسال الرزمة عبر الوصلة التالية في الوجه باتجاه دوران عقارب الساعة (أو عكس عقارب الساعة في حال استخدام قاعدة اليد اليسرى) بالنسبة للعقدة الحالية. عندما تصل الرزمة إلى الوصلة المتقاطعة مع الخط الواصل المصدر والمصرف، يتم الانتقال إلى الوجه التالي وعبوره بنفس الطريقة. تستمر الخوارزمية بالعمل وفق هذه الآلية لحين الوصول إلى الوجهة أو لحين عبور الوصلة الأولى في الوجه الحالي مرتين [65].



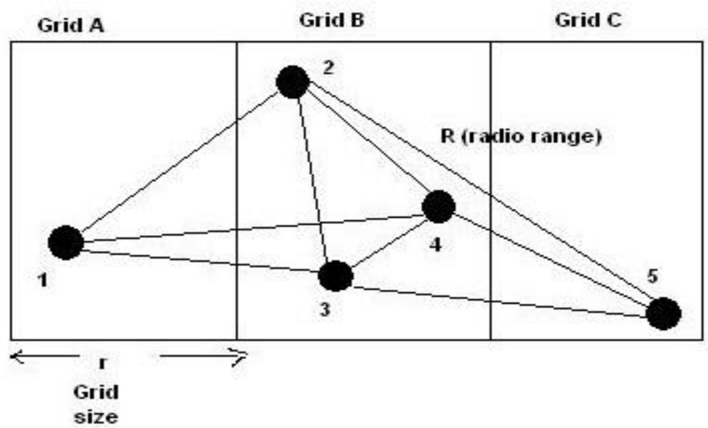
شكل (٤–١٣) العبور باستخدام التوجيه الوجهي

كما هو مو ضح بالشكل (٤–١٣) يتم عبور الشبكة ابتداءً من العقدة S، وباستخدام قاعدة اليد اليمنى يتم عبور الوجه F_1 لحين الوصول إلى الوصلة التي تتقاطع مع الخط الواصل بين المصدر والمصرف، عندها يتم الانتقال إلى الوجه F_3 وعبوره أيضاً بالاعتماد على قاعدة اليد اليمنى، لحين الوصول إلى الوصلة التي تتقاطع مع الخط الواصل بين المصدر والمصرف، عندها يتم الانتقال إلى الوجه F_5 والذي يحوي العقدة الوجهة ضمن عقده.

٤–٤–٢ بروتوكول GAF:

بروتوكول الصحة الجغرافية المعتمدة Geographic Adaptive Fidelity أو GAF [66]، هو عبارة عن بروتوكول توجيه جغرافي يراعي استهلاك الطاقة. صمم خصيصاً للشبكات الغرضية المتحركة، ولكنه استخدم في شبكات الحساسات اللاسلكية. يسعى هذا البروتوكول إلى أمثلة أداء شبكات الحساسات عن طريق تحديد العقد المتماثلة من ناحية تسيير الرزم. في هذا البروتوكول تعتمد كل عقدة على معلومات الموقع الخاصة بها من أجل ربط نفسها مع شبكة افتراضية (Virtual Grid)، بحيث يتم تقسيم كامل المنطقة التي تغطيها شبكة الحساسات إلى شبكات مربعة (Square Grids)، والعقد التي تملك أكبر قدر من الطاقة في كل Grid تصبح رئيسة لها. يتم اعتبار العقدتين متماثلتين عندما يكون لهما نفس المجموعة من العقد الجارة وبالتالي تنتميان لنفس مسارات التوجيه، ويتم استثناء المصرف والمصدر من هذه القاعدة.

تستخدم العقد معلومات موقعها لربط نفسها بنقطة ضمن الـ Grid، داخل كل منطقة تتعاون العقد مع بعضها البعض لتنفيذ المهام المطلوبة. فعلى سبيل المثال تختار العقد الموجودة في نفس المنطقة عقدة منها لتبقى بحالة نشطة لفترة محددة من الزمن ومن بعد هذه الفترة تصبح في حالة سبات. تكون العقدة المختارة مسؤولة عن مراقبة المنطقة وإرسال البيانات إلى المصرف بالنيابة عن جميع العقد في المنطقة، وتسمى هذه العقدة بالعقدة الرئيسة. باقي العقد في المنطقة ينظر إليها كعقد احتياطية للعقدة الرئيسة، وبالتالي يمكن وضعهم في حالة سبات من دون التأثير على صحة عملية التوجيه. يوضح الشكل (٤–١٤) مجموعة من العقد الموزعة على Grids افتراضية في بروتوكول GAF، العقد ٢ و ٣ و ٤ الموجودة ضمن B هي عقد متماثلة على اعتبار أن أي من هذه العقد تستطيع نقل البيانات بين العقدتين ١ و ٥، تختار هذه العقد إحداها لتكون الرئيسة وتكون بحالة فعّالة في حين تنتقل العقدتان المتبقيتان إلى حالة السبات.



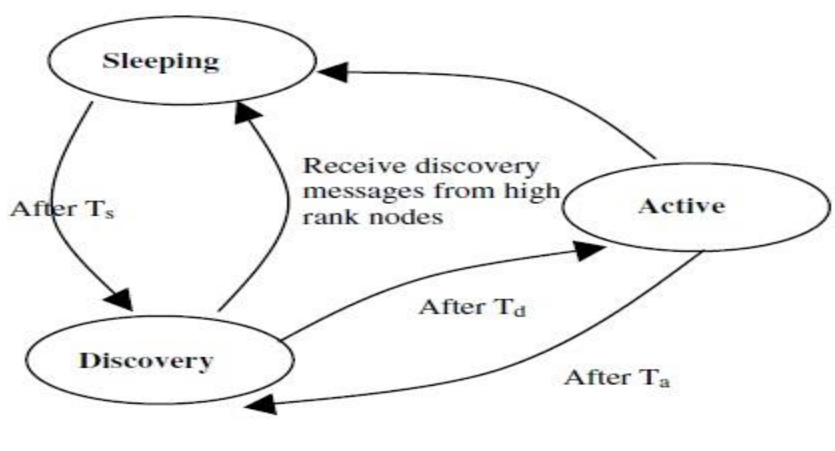
شكل(٤-١٤) بروتوكول GAF والشبكات الافتراضية

يحافظ بروتوكول GAF على طاقة العقد عن طريق إيقاف تشغيل العقد غير الضرورية في الشبكة من دون التأثير على صحة عملية التوجيه. يمكن استنتاج حجم الـ Grid الافتراضية r بسهولة من خلال العلاقة التي تربطه مع نصف قطر الإرسال R والتي تعطى بالمعادلة التالية:

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \qquad (4.5)$$

يوجد ثلاث حالات يمكن أن توجد بها العقد في بروتوكول GAF، هذه الحالات موضحة بالشكل (٤-١٥)، هذه الحالات هي:

- حالة الاستكشاف: من أجل تحديد العقد المتواجدة في نفس الـ Grid.
- الحالة الفعّالة: تكون العقدة هي العقدة الرئيسة للـ Grid وتقوم بعمليات توجيه البيانات إلى المصرف.
- حالة السبات: عندما يتم إيقاف دارات الإرسال/ الاستقبال اللاسلكية الخاصة بالعقدة.



شكل (٤-١٥) حالات العقد في بروتوكول GAF

لدعم حركة العقد، تقوم كل عقدة متحركة بتقدير الزمن الذي ستخرج فيه من الـ Grid، ومن ثم تقوم بإرساله إلى جيرانها. تقوم العقد الجارة بضبط فترة السبات الخاصة بها بناءً على هذه الزمن بهدف الإبقاء على صحة عملية التوجيه. قبل أن تخرج العقدة المتحركة من الشبكة تستيقظ العقد التي كانت بحالة سبات ويتم اختيار أحدها كعقدة قائدة. يوضح الشكل (٤–١٥) آلية الانتقال بين هذه الحالات.

يتم اختيار العقدة القائدة في كل Grid وفق الآلية التالية، في البداية تكون العقد في حالة استكشاف وتتبادل رسائل الاستكشاف مع جيرانها. تتضمن هذه الرسائل معرّف الـ Grid وذلك بهدف التعرف على باقي العقد الموجودة في نفس الـ Grid. تصبح العقدة عقدة قائدة إذا لم تتلقى أية رسالة استكشاف لفترة زمنية محددّة مسبقاً T_d. في حال وجود أكثر من عقدة في حالة استكشاف ضمن نفس الـ Grid، يتم اختيار العقدة ذات فترة الحياة المتوقعة الأطول كعقدة قائدة. تبقى العقدة القائدة بحالة فعّالة وتعالج طلبات التوجيه فترة زمنية محدّدة مسبقاً T_a. بعد انقضاء هذه الفترة الزمنية، تقوم العقدة بتغيير حالتها إلى حالة استكشاف وذلك لإفساح المجال لباقي العقد الموجودة في نفس الـ Grid بأن تكون عقد قائدة. في الحالات التي تحتوي عقد متحركة بشكل كثيف، تستيقظ العقد الموجودة بحالة السبات بشكل أبكر لأخذ دور العقد القائدة، حيث يتم حساب الفترة الزمنية التي تستطيع خلالها العقدة الدخول بحالة سبات T_s بناءً على تقدير الفترة الزمنية التي ستبقى بها العقد القائدة ضمن الـ Grid، أي أن العقد ستدخل إلى السبات، و ما هي فترة هذا السبات، ترتبطان بالتطبيق وتتعلقان بمعاملات يتم ضبطها خلال عملية التوجيه.

يسعى بروتوكول GAF للحفاظ على الشبكة متصلة، من خلال الإبقاء على عقدة ممثلة عن كل منطقة من الـ Grid الافتراضية بحالة نشطة. بالرغم من أن بروتوكول GAF هو بروتوكول جغرافي، ولكن يمكن اعتباره أيضاً بروتوكولاً هرمياً، حيث يتم إنشاء العناقيد بناءً على معلومات العقد. من أجل كل منطقة من الـ Grid يوجد عقدة ممثلة لهذه المنطقة تقوم بإرسال البيانات إلى باقي العقد، ولكن هذه العقد لا تقوم بعمليات تجميع وتنعيم البيانات التي تقوم بها العقد رؤوس العناقيد في البروتوكولات الهرمية.

٤–٤–٣ بروتوكول GEAR:

اقترح Yu في [67] أن يتم استخدام معلومات الموقع أثناء عملية نشر الاستعلامات باتجاه مناطق محدّدة، على اعتبار أن معلومات الاستعلامات تتضمن غالباً مواصفات جغرافية. سمّي هذا البروتوكول التوجيه الجغرافي والمراعي لاستهلاك الطاقة Geographic & Energy Aware Routing أو GEAR، والذي

يقوم باختيار العقدة الجارة أثناء توجيه الرزم باتجاه منطقة ما بناءً على معلومات جغرافية وبشكل يراعي استهلاك الطاقة. الفكرة الأساسية هي تقليل عدد الاهتمامات في النشر الموجه من خلال نشر هذه الاهتمامات خلال منطقة محدّدة عوضاً عن نشرها عبر كامل الشبكة، وبذلك يستطيع GEAR حفظ الطاقة أكثر مما يفعل بروتوكول النشر الموجه.

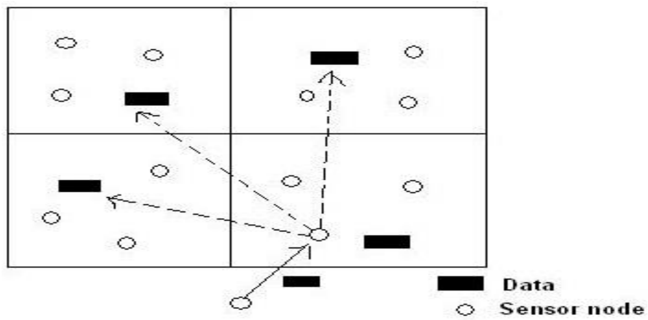
في هذا البروتوكول، كل عقدة تحتفظ بكلفة تقديرية وكلفة تعليمية للوصول إلى المصرف عبر جيرانها. الكلفة التقديرية ناتجة عن دمج الطاقة المتبقية لدى العقدة والمسافة التي تفصلها عن المصرف. الكلفة التعليمية هي عبارة عن تحسين للكلفة التقديرية والتي تأخذ بعين الاعتبار التوجيه حول الحفر (Holes) التي من الممكن أن تتواجد في الشبكة. تحدث الحفر عندما لا تجد العقدة الحالة أي عقدة جارة أقرب منها إلى المنطقة الوجهة. في حال عدم وجود حفر في الشبكة تكون الكلفة التقديرية مساوية للكلفة التعليمية. يتم إرسال الكلفة التعليمية إلى العقد السابقة في كل مرة يتم فيها تسليم رزمة إلى المنطقة الوجهة وذلك بهدف ضبط المسار من أجل الرزم القادمة.

إن آلية توجيه الرزمة إلى كل العقد في المنطقة المستهدفة تتكون من مرحلتين:

١- توجيه الرزم إلى المنطقة المستهدفة: حالما تستقبل العقدة رزمة جديدة، تقوم بالتحقق من جيرانها لترى إن كان هناك جار أقرب منها إلى المنطقة الوجهة. في حال وجود أكثر من جار يتم اختيار الجار الأقرب للمنطقة الوجهة، أما في حال كانت جميع العقد الجيران أبعد من العقدة الحالية عن المنطقة المستهدفة، فهذا يعني وجود حفرة في الشبكة. في هذه الحالة يتم اختيار أحد الجيران لإرسال البيانات إليه بالاعتماد على تابع الكلفة التعليمية. يمكن أن يتم تعديل هذا الاختيار لاحقاً بناءً على تقارب تابع الكلفة التعليمية أثنا تسليم الرزمة.

٢- توجيه الرزم ضمن المنطقة المستهدفة: حالما تصل الرزمة إلى المنطقة المستهدفة، يمكن نشرها عبر هذه المنطقة إما بالاعتماد على التسيير الجغرافي العودي (Recursive Geographic Forwarding) أو بالإغراق المحدّد. يعتبر الإغراق المحدّد خياراً جيداً عندما لا تكون العقد منشورة بكثافة. أما في حال كانت العقد منشورة بكثافة فإن خيار التسيير الجغرافي العودي يعتبر أكثر توفيراً للطاقة. في هذه الطريقة يتم تقسيم المنطقة إلى أربع مناطق جزئية ويتم إنشاء أربع نسخ من الرزمة

وإرسال نسخة إلى كل منطقة جزئية، تستمر عملية التجزئة والإرسال لحين الوصول إلى مناطق تحتوي فقط على عقدة وحيدة. كما هو موضح بالشكل (٤-١٦).



شكل (٤-١٦) التسير الجغرافي العودي

يواجه هذا البروتوكول مشكلة في قدرته على التوسع، بالإضافة لغياب عمليات تجميع وتنعيم البيانات.

٤-٤-٤ بروتوكول GeRaf

تم اقتراح هذا البروتوكول من قبل Zorzi & Rao في [68]. يستخدم هذا البروتوكول معلومات مواقع العقد لتوجيه الرزم باتجاه المصرف، حيث يفترض أن جميع العقد على معرفة بمواقعها وموقع العقدة المصرف.

تتم عملية التوجيه باتجاه المصرف وفق مبدأ Best effort أي أنه لايوجد ضمانة لتسليم هذه الرزم إلى المصرف. العقدة التالية المبدّلة (Next Relay Node) باتجاه المصرف لا تكون معلومة بشكل مسبق لدى العقدة المرسلة، لكن يتم تحديدها بعد أن يتم إرسال الرزمة. هذه الطريقة تأخذ فاعليتها من كون الإرسال الذي تقوم به العقدة في شبكات الحساسات اللاسلكية هو عبارة عن تعميم يصل لكل العقد التي تستطيع سماع هذا الإرسال – من وجهة نظر المرسل–. في حال تغير طبولوجيا الشبكة بشكل عشوائي، فمن الممكن أن لاتكون العقدة على معرفة أي من جيرانها هو بالموقع الأفضل ليتم إرسال البيانات إليه. هذه الآلية تقوم بتنفيذ التنافس بين العقد في طرف الاستقبال عوضاً عن طرف الإرسال، تعتبر هذه الآلية غير تقليدية على اعتبار أن العقد المستقبلة هي التي تقوم بالتنافس من أجل الحصول على الوصول إلى قناة الإرسال. من الممكن أن توجد أكثر من عقدة بنفس الأولوية لاستقبال الرسالة، تقوم آلية التنافس في طرف الاستقبال بضمان وجود

مستقبل وحيد للرسالة وضمان وجود نسخة وحيدة من الرزمة في الشبكة. آلية التنافس في طرف الاستقبال المقترحة في [68] تعتمد بشكل أساسي على بروتوكول MAC الخاص بالوصول إلى الوسط.

بالإضافة لقيامه بتوجيه الرزم بالاعتماد على معلومات العقد، يستخدم هذا البروتوكول جدولاً لتغّير حالة العقد بين الحالة الفعّالة وحالة السبات، من دون أن يفرض على العقد أن تقوم بمتابعة حالة العقد المجاورة لها. الهدف من تغير حالة العقد هو إطفاء المرسلات/ المستقبلات اللاسلكية لفترة من الزمن والذي من شأنه أن يحقق أكبر وفر ممكن في استهلاك الطاقة، على اعتبار أن عمليات الإرسال والاستقبال والاستماع لقنوات الاتصال اللاسلكية تستهلك المقدار الأكبر من الطاقة في هذه الشبكات.

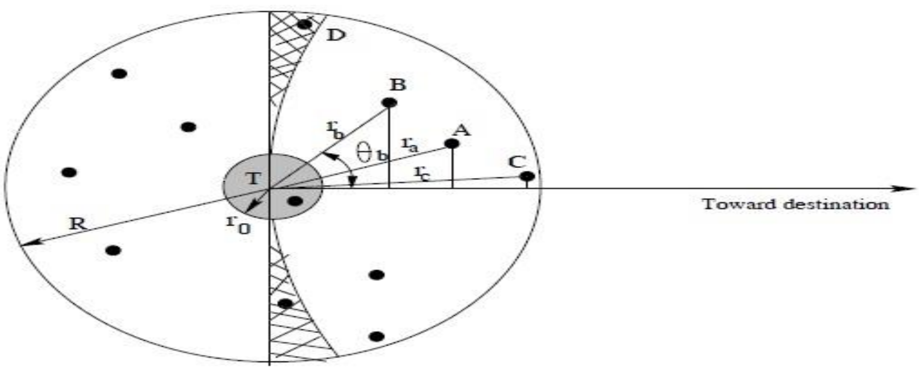
عندما ترغب العقدة بإرسال بيانات إلى المصرف (سواء تم استقبال هذه البيانات من عقد أخرى أو تم الحصول عليها من الوسط)، تقوم بالبداية بفحص قناة الإرسال إذا كانت متاحة لتجنب التصادم. في حال بقيت القناة اللاسلكية خاملة لفترة زمنية محدّدة، تقوم العقدة بتعميم طلب إرسال RTS (Request To Send) إلى جميع العقد الفعّالة التي تقع ضمن مدى إرسالها. تتضمن الرسالة أيضاً موقع العقدة مصدر الرسالة وموقع العقدة المصرف. تقوم العقد التي استقبلت هذه الرسالة بتقدير أولويتها بأن تكون العقدة المبدلة التالية بناءً على موقعها و موقع العقدة المصرف. يتم تقسيم المنطقة التي يغطيها إرسال العقدة والمقابلة للمصرف – التي تدعى منطقة التقدم- إلى عدة قطاعات وكل قطاع بأولوية محددة، كل العقد الموجودة في نفس القطاع يكون لها نفس الأولوية. تكون المنطقة الأقرب للمصرف ذات أولوية عليا وتتناقص هذه الأولوية باتجاه العقدة الحالية. تنتظر العقدة المصدر الحالية رسالة CTS (Clear To Send) من العقد المجاورة لها والموجودة في منطقة التقدّم. بعد استلام هذه الرسالة يتم إرسال البيانات إلى العقدة المختارة كمبدّلة تالية والتي بدورها بعد استلام البيانات تقوم بإرسال إقرار استلام Ack. تتبع العقدة المبدّلة التالية نفس الإجراء لإرسال البيانات لحين وصول هذه البيانات إلى المصرف. إذا كانت العقد بكثافة جيدة، غالباً ما يتم اختيار العقدة الأقرب للمصرف التي تحقق أكبر تقدم كعقدة مبدّلة تالية. من الممكن أن لاتستقبل العقدة أي رسالة CTS من العقد المجاورة، في هذه الحالة تقوم العقدة بالتراجع عن عملية الإرسال لفترة زمنية محدّدة، ومن ثم تعيد محاولة الإرسال. بعد عدد محدّد من المحاولات إما أن تجد العقدة المرسلة عقدة مبدّلة تالية أو تقوم بحذف الرزمة عند تجاوز الحد الأعظمي لعدد مرات محالة الإرسال.

ما يميز هذا البروتوكول أنه يعتمد في التوجيه فقط على معلومات مواقع العقد، وبدون الحاجة إلى جداول توجيه أو حفظ تغيرات طبولوجيا الشبكة وجميع عمليات هذا البروتوكول محلية، وهذا ما يخفّض الحمل الناتج عن عملياته إلى أقل حد ممكن ويمنحه قابلية عالية للتوسع ليشمل عدداً كبيراً من الحساسات في الشبكة.

٤-٤-٥ بروتوكول MECF

بروتوكول آخر من بروتوكولات التوجيه التي تعتمد على مواقع العقد، تم اقتراح MECF (Minimum Energy Consumption Forwarding) لتحسين خوارزمية التقدم الطامع [69]. من المعلوم أنه في قنوات الاتصال اللاسلكي تنخفض قوّة الإشارة مع انتشارها عبر الوسط، لذلك خلال كل قفزة في الاتصالات اللاسلكية متعددة القفزات، كلما زادت المسافة الفاصلة بين المرسل والمستقبل فإن مقدار SNR ينخفض، والذي يتتج عنه معدّل خطأ كبير في الخانة BER (Bit Error Rate) ومنه ينتج معدّل خطأ كبير في الرزم PER (Packet Error Rate). تقوم خوارزمية التقدم الطامع بتقليل عدد القفزات للحد الأدنى وذلك بهدف التقليل من التأخير الزمني بين إنشاء الرزمة وتسليمها للمصرف، ويتم ذلك عن طريق اختيار العقدة الأبعد عن العقدة الحالية والأقرب إلى الوجهة كعقدة مبدلة تالية. يمكن أن يكون هذا الخيار غير مناسب من حيث إنتاجية الشبكة واستهلاك الطاقة. يسعى هذا البروتوكول لزيادة انتاجية الشبكة وتقليل استهلاك الطاقة عن طريق أخذه بعين الاعتبار خصائص الأخطاء لقنوات الاتصال اللاسلكي.

يفترض هذا البروتوكول أن العقد على معرفة بمواقعها وموقع العقدة المصرف، بالإضافة لمعرفة كل عقدة بمواقع العقد الجيران المباشرين لها. يتميز هذا البروتوكول بآلية موزعة للعمل، يعتمد على مقدار استهلاك الطاقة لنقل الرزمة بشكل صحيح عبر واحدة تقدّم واحدة E_c كمقياس للأداء. يتم حساب هذا المقياس من قبل العقدة المرسلة الحالية لكافة العقد الجارة التي تحقق تقدّماً باتجاه المصرف، الجار الذي يملك أقل قيمة لـ E_c يصبح العقدة التالية ويتم إرسال البيانات إليه. في حال وجود أكثر من عقدة تملك نفس القيمة من E_c يتم اختيار إحدى هذه العقد بناءً على شرط معيّن مثل مقدار الطاقة المتبقية لدى العقدة أو العقدة التي لديها رتل انتظار أقصر.



شكل (٤–١٧) آلية عمل MECF

يوضح الشكل (٤–١٧) آلية عمل البروتوكول، العقد الجارة التي تحقق تقدّماً باتجاه المصرف هي (A,B,C)، العقدة المرسلة الحالية T، يمكن لأي من هذه العقد أن تكون العقدة التالية. حسب خوارزمية التقدم الطامع فإن العقدة التالية هي C على اعتبارها الأقرب للمصرف، لكن في نفس الوقت تملك أعلى قيمة لـ E_c. تملك العقدتان A و B تقريباً نفس جودة الوصلة، لكن على اعتبار العقدة A تحقق تقدماً أكبر باتجاه المصرف فإنها تملك أقل قيمة لـ E_c، وبالتالي ستكون هي العقدة التالية. تتم العمليات الحسابية لتحديد العقدة التالية بالاعتماد على معلومات ثابتة مثل المسافة الاقليدية بين العقدتين، و بالاعتماد على إحصائيات متغيرة مع الزمن مثل الضجيج وشدّة التداخل.

٤–٥ بروتوكولات التوجيه التي تعتمد على نمذجة التدفق ضمن الشبكة:

في هذا النوع من بروتوكولات التوجيه يتم أخذ تدفق الحركة عبر الشبكة و متطلبات جودة الخدمة بعين الاعتبار عند اتخاذ قرار التوجيه. وفيما يلي مجموعة من هذه البروتوكولات

٤–٥–١ بروتوكول MLER:

قدّم كل من Chonge و Tassiulas حلاً لمشكلة التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية، تم بناء هذا الحل بالاعتماد على تدفق الحركة عبر الشبكة وهو بروتوكول Maximum Lifetime Energy Routing أو MLER [70]. إن الهدف الرئيسي من هذا البروتوكول هو إطالة فترة حياة الشبكة لأقصى حد ممكن من خلال التعريف الدقيق لكلفة الوصلات بين العقد. يعرّف هذا البروتوكول الكلفة على أنها تابع لمقدار الطاقة

المتبقية لدى العقدة ومقدار الطاقة اللازمة للإرسال عبر الوصلة بين العقدتين. لإيجاد المسار المكوّن من أفضل الوصلات الممكنة، يعتمد هذا البروتوكول على خوارزميتين. تختلف هاتان الخوارزميتان عن بعضهما بتعريف كلفة الوصلة وآلية استخدام مقدار الطاقة المتبقية لدى العقدة في حساب كلفة الوصلة. عوضاً عن الاعتماد على e_{ij} وهي مقدار الطاقة المستهلكة عند إرسال رزمة عبر الوصلة بين العقدتين i,j، تستخدم الخوارزميتان تابعي الكلفة التاليين:

$$c_{ij} = \frac{1}{E_{-i} - e_{ij}} \quad (4.6)$$

$$c_{ij} = \frac{e_{ij}}{E_{-i}} \quad (4.7)$$

حيث E_{-i} هو مقدار الطاقة المتبقية لدى العقدة i

بالاعتماد على خوارزمية Bellman–Ford لإيجاد المسار الأقصر، يتم إيجاد المسار الأقصر باتجاه المصرف بالاعتماد على تابعي الكلفة السابقين. المسار صاحب الكلفة الأقل باتجاه المصرف هو المسار المكون من عقد لديها طاقة متبقية أكبر من مقدار الطاقة المتبقية لدى باقي العقد في المسارات. يمكن أن يتم تحسين هذا البروتوكول عن طريق استخدام مقاييس أخرى لكلفة الوصلات، منها ما يتعلق بمقدار الطاقة المتبقية النسبية، والتي تعكس المعدّل المتوقّع لاستهلاك الطاقة.

٤–٥–٢ بروتوكول MLDG:

قدّم Kalpakis بروتوكول MLDG (Maximum Lifetime Data Gathering)، تمت نمذجة إنشاء المسارات والتوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية على أنها مشكلة تجميع بيانات مع إطالة حياة الشبكة لأقصى حد ممكن، وكان الحل المقترح هو عبارة عن خوارزمية تحتاج لوقت لإيجاد الحل يتناسب مع حجم الشبكة (Polynomial Time) [71]. فترة حياة النظام T تم تعريفها على أنها عدد التكرارات التي يتم خلالها أخذ القراءات من الحساسات لحين موت أول حساس. جدول جمع البيانات يحدّد من أجل كل تكرار من التكرارات آلية الحصول على البيانات من العقد وتوجيهها باتجاه المصرف. يملك الجدول شجرة خاصة بكل تكرار، تبدأ هذه الشجرة بالمصرف وتمتد لتشمل كل العقد في الشبكة. تعتمد فترة حياة النظام على الفترة

الزمنية التي يبقى خلالها الجدول صحيحاً. لزيادة فترة حياة الجدول لأقصى حد ممكن تم اقتراح خوارزمية Maximum Lifetime Data Aggregation أو MLDA، تأخذ هذه الخوارزمية تجميع البيانات وتنعيمها بعين الاعتبار أثناء إنشاء المسارات لإطالة عمر الشبكة لأقصى حد ممكن. في هذه الحالة إذا كان الجدول S مكوّناً من T تكرار، يكون لدينا شبكة تدفق G. شبكة التدفق ذات فترة الحياة العظمى الخاضعة لقيود مصادر طاقة الحساسات تدعى شبكة التدفق المقبولة المثلى. يتم بناء جدول بالاعتماد على شبكة التدفق المقبولة، وقدّم الباحثون آلية لبناء هذا الجدول.

إصدار آخر من هذا البروتوكول أخذ بعين الاعتبار حالة التطبيقات التي لايمكن خلالها إجراء تجميع للبيانات، مثل تدفقات الفيديو من الحساسات. تم تسمية هذه الحالة بفترة الحياة العظمى مع توجيه البيانات Maximum Lifetime Data Routing أو MLDR، وقد تم نمذجة هذه الحالة كشبكة تدفق مع قيود في الطاقة على الحساسات.

تم تحقيق كل من MLDR و MLDA ومقارنتهما مع بروتوكول PEGASIS بالنسبة لفترة حياة الشبكة. أظهرت النتائج أن كلا الخوارزميتين تحققان أداء أفضل من بروتوكول PEGASIS، غير أنه في MLDA يكون التأخير الزمني في تسليم الرزم أكبر من التأخير في حالة PEGASIS. في حين أن MLDA تحقق أداء أفضل من باقي البروتوكولات بالنسبة لفترة حياة الشبكة. سيئة هذه الخوارزميات هي أنها Polynomial Time وبالتالي فإن الكلفة الحسابية لها تزداد مع ازدياد حجم الشبكة.

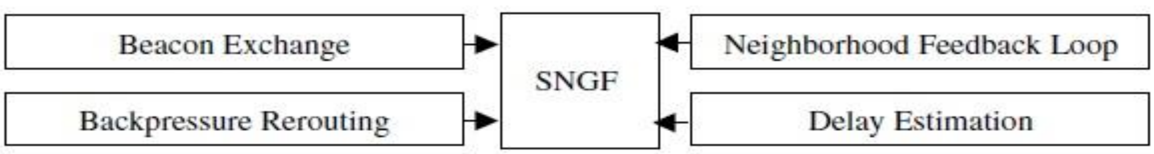
٤–٥–٣ بروتوكول SAR:

توجيه الاسناد التسلسلي Sequential Assignment Routing، يعتبر أول بروتوكول لشبكات الحساسات اللاسلكية يأخذ بعين الاعتبار متطلبات جودة الخدمة [72,73]. يعتبر هذا البروتوكول من البروتوكولات التي تعتمد على جداول التوجيه، ويرسل عدة نسخ من الرزمة عبر الشبكة وليس نسخة واحدة، بالإضافة لسعيه لتحقيق الكفاءة في استهلاك الطاقة و السماحية في الأخطاء. يُنشئ هذا البروتوكول أشجاراً جذورها العقد التي تبتعد قفزة واحدة عن المصرف، مع الأخذ بعين الاعتبار متطلبات جودة الخدمة مثل موارد الطاقة في كل مسار من المسارات و مستوى أولوية الرزم. باستخدام هذه الأشجار يتم إنشاء عدة مسارات من المصرف

إلى العقد. يتم اختيار أحد هذه المسارات بناءً على موارد الطاقة وجودة الخدمة ضمن ذلك المسار. يتم تجاوز الأخطاء عن طريق فرض تحديث جداول التوجيه لتصبح متماثلة لدى العقد على طول المسار. أي خطأ محلّي ينتج عنه البدء بشكل آلي بعملية استعادة محلّية للمسار. بالرغم من أن هذا البروتوكول يحفظ عدة مسارات من العقدة باتجاه المصرف – التي تهدف إلى ضمان تسليم البيانات و زيادة مناعة البروتوكول ضد الأخطاء و سهولة تجاوز الأخطاء حال وقوعها – إلا أنها تسبب حملاً زائداً وخاصةً في حال كان حجم الشبكة كبيراً على العقد التي يتوجب عليها حفظ هذه بيانات هذه الجداول.

٤–٥–٤ بروتوكول SPEED:

هو عبارة عن بروتوكول توجيه يراعي جودة الخدمة في شبكات الحساسات اللاسلكية، مع ضمان تسليم الرزم إلى المصرف [74]. يتطلب هذا البروتوكول من كل عقدة من العقد بأن تحفظ بيانات عن جيرانها واستخدم التسيير الجغرافي لتوجيه الرزم باتجاه المصرف، بالإضافة إلى ذلك يسعى هذا البروتوكول لضمان سرعة معينة لحركة الرزم عبر الشبكة، بحيث يستطيع التطبيق تقدير التأخير الزمني ما بين توليد الرزمة وتسليمها للمصرف، عن طريق تقسيم المسافة بين المصدر والمصرف على سرعة حركة الرزمة عبر الشبكة، بالإضافة لدعمه لآليات لتجنب الإزدحام في الشبكة.



شكل (٤–١٨) مكونات بروتوكول SPEED

يدعى مكوّن التوجيه في هذا البروتوكول بالتسيير الجغرافي غير المحدد عديم الحالة Stateless Geographic Non-deterministic Forwarding أو SNFG، ويعمل هذا المكوّن مع أربعة مكونات أخرى ضمن طبقة الشبكة لتوجيه البيانات كما هو موضح بالشكل (٤–١٨). تقوم آلية تبادل المرشد اللاسلكي (Beacon exchange) بجمع البيانات عن العقد ومواقعها. يتم تقدير التأخير الزمني في كل عقدة من العقد بحساب الوقت الفاصل بين إرسال الرزمة إلى إحدى العقد و وصول الإقرار لهذ الرزمة. بالاعتماد على قيم التأخير، تختار SNGF العقدة الجارة التي تحقق متطلبات السرعة. في حال عدم وجود

هكذا عقدة يتم الاعتماد على معدّل التبديل للعقد. وحدة التغذية الراجعة الخاصة بالجيران مسؤولة عن تأمين معدّل التبديل، والذي يتم حسابه بالاعتماد على معدّل الفشل لكل عقدة من العقد الجيران (يحدث الفشل في العقدة عندما لاتستطيع تأمين السرعة المطلوبة) ومن ثم يتم إرساله إلى SNGF. في حال كان معدّل التبديل أقل من رقم مولّد بشكل عشوائي بين ٠ و ١ فيتم اسقاط الرزمة. وحدة الضغط الخلفي لإعادة التوجيه تستخدم لمنع الحالات التي لا تستطيع العقدة فيها إيجاد عقدة تالية (Voids)، وتجنب حالات الإزدحام في الشبكة عن طريق إرسال رسائل للعقد مصادر الحركة الزائدة تجعلها تبحث عن مسارات أخرى لإرسال البيانات.

يمتاز هذا البروتوكول بأن الحمل الناتج عن رزم التحكم الخاصة به هو حمل قليل، وبأنه يقوم بتوزيع الحركة عبر الشبكة عن طريق الآلية المعتمدة في SNGF لنشر الرزم.

٤-٦ الخلاصة

قدّم هذا الفصل استعراض لأنواع بروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية. من ضمن هذه الأنواع بروتوكولات التوجيه المعتمدة على مواقع العقد والتي تسمى أيضاً بروتوكولات التوجيه الجغرافية. تفترض هذه البروتوكولات أن كل العقد في الشبكة على معرفة دقيقة بموقعها ضمن الشبكة وذلك باستخدام تقنيات تحديد موقع عبر الشبكة، ولكن هذه التقنيات تقوم بتحديد مواقع تقريبية للعقد مع مقدار خطأ يختلف من تقنية لأخرى، ويرتبط أيضاً بعوامل أخرى مثل عدم دقّة القياسات التي تقوم بها العقد، و كثافة العقد ضمن الشبكة، و نسبة العقد المرشدة المعروفة الموقع بدقة بالنسبة للعدد الكلي للعقد ضمن الشبكة. نظراً لكون توصيف هذه البروتوكولات لا يأخذ بعين الاعتبار هذه الأخطاء، سيتم دراسة أثر هذه الأخطاء على استهلاك الطاقة في هذه البروتوكولات لما لها من اثر كبير على عمل هذا النوع من الشبكات.

الفصل الخامس: التحليل الرياضي

تفترض بروتوكولات التوجيه الجغرافية (المعتمدة على موقع العقد) أن مواقع العقد محددة وبشكل دقيق، لكن في الحقيقة تقوم العقد بتقدير هذه المواقع بناءً على عمليات قياسات متبادلة بين العقدة وجيرانها، وبالتالي هناك مقدار من الخطأ في مواقع العقد يؤثر على أداء هذه البروتوكولات.

أوضحت إحدى الدراسات أثر هذه الأخطاء على معدّل تسليم الرزم في الشبكة، بالإضافة لتسببها في زيادة استهلاك الطاقة ضمن الشبكة وذلك بسبب فشل عمليات الإرسال التي تعتبر السبب الرئيسي لاستهلاك الطاقة ضمن هذه الشبكات، بالإضافة التقدّم العكسي Backward progress [2].

سنقدم نموذج رياضي يمثل الأخطاء في مواقع العقد، وبالاعتماد على هذا النموذج سنحلل أثر هذه الأخطاء على أداء هذا النوع من البروتوكولات وخاصةً مقدار التغيّر في استهلاك الطاقة .

٥-١ النموذج الرياضي للأخطاء في مواقع العقد:

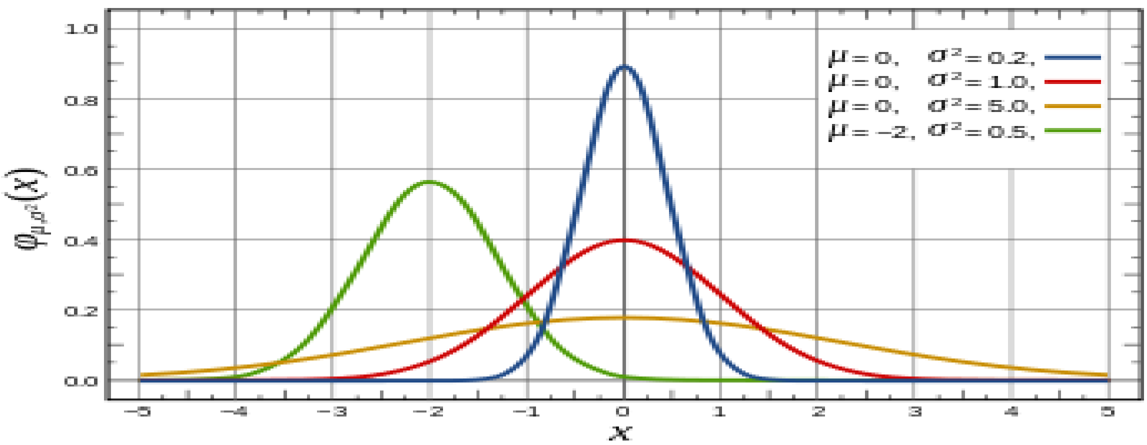
هناك العديد من الأبحاث التي درست تقنيات تحديد مواقع العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية، والأخطاء التي من الممكن أن تتعرض لها. والعوامل التي تؤثر على الأخطاء في تحديد مواقع العقد، ومن هذه العوامل عدم دقّة القياسات التي تقوم بها العقد، و كثافة العقد ضمن الشبكة، و نسبة العقد المرشدة المعروفة الموقع بدقة بالنسبة لعدد العقد.

في هذه الدراسة سنقوم بتمثيل البيئة التي ستنتشر فيها الحساسات باستخدام مستوي ديكارتي، وبالتالي كل عقدة لها إحداثيات $(y،x)$ ضمن هذا المستوي. يمكن تمثيل الخطأ في الموقع لكل عقدة من العقد باستخدام متحول عشوائي طبيعي وذلك بسبب كثرة العوامل التي تساهم في هذا الخطأ، حيث يمكن تمثيل كل عامل من هذه العوامل بمتحوّل عشوائي، ومجموع هذه المتحولات العشوائية يمثل متحول عشوائي يخضع للتوزيع الطبيعي حسب نظرية النهاية المركزية [68]، حيث يتم إضافة متحول عشوائي طبيعي لإحداثيات العقدة على المحور (OX) يمثّل الخطأ على هذا المحور، وأيضاً متحول عشوائي طبيعي لإحداثيات العقدة على المحور (OY) يمثّل الخطأ على هذا المحور، يوضح الشكل (١.٥) تابع الكثافة الاحتمالي للتوزيع الطبيعي.

يخضع هذين المتحولين للتوزيع الطبيعي بمتوسط $(\mu = 0)$ وانحراف معياري (σ). يمكن إثبات أن قيمة المتوسط $(\mu = 0)$ باستخدام قانون الأعداد الكبيرة (Large number law):

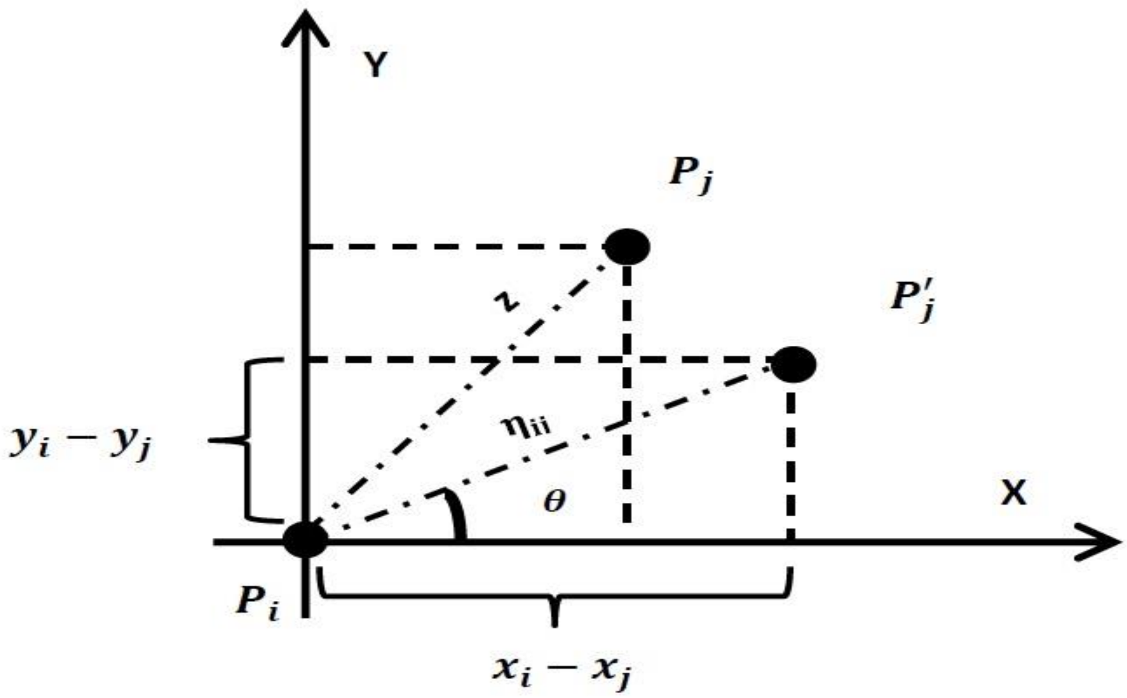
$$\lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k = 0 \qquad (1.5)$$

حيث n تمثل عدد عقد الشبكة، x_k تمثل الخطأ في تحديد موقع العقدة i على أحد المحاور.



شكل (١.٥) تابع الكثافة الاحتمالي للتوزيع الطبيعي

سنفرض أن الخطأ في موقع كل عقدة من العقد مستقل عن الخطأ في باقي عقد الشبكة، و أن الانحراف المعياري للخطأ على المحور OX يساوي الانحراف المعياري على المحور OY من أجل كل عقدة من العقد وذلك بهدف تسهيل الدراسة.



شكل (٢.٥) يوضح المسافة الحقيقية والمسافة المقاسة بين العقد

حسب ما هو موضح بالشكل (٢.٥)، لدينا عقدتين P_i و P_j بحيث :

الموقع الحقيقي للعقدتين $P_i(X_i, Y_i)$ ،$P_j(X_j, Y_j)$ والموقع الذي تم قياسه باستخدام تقنيات تحديد الموقع $P'_i(x_i, y_i)$ ،$P'_j(x_j, y_j)$ وبالتالي :

$$X_i = x_i + w_i \quad (2.5)$$

$$Y_i = y_i + w_i \quad (3.5)$$

$$X_j = x_j + w_j \quad (4.5)$$

$$Y_j = y_j + w_j \quad (5.5)$$

حيث : $w_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ هو عبارة عن متحول عشوائي يخضع للتوزيع الطبيعي بمتوسط $(\mu_i = 0)$ وانحراف معياري (σ_i)، و $w_j \sim N(0, \sigma_j^2)$ هو أيضاً متحول عشوائي يخضع للتوزيع الطبيعي بمتوسط $(\mu_j = 0)$ وانحراف معياري(σ_j).

سنعتمد في هذه الدراسة على المسافة الإقليدية بين نقطتين، $P_i(x_i, y_i)$ و $P_j(x_j, y_j)$ والتي تعطى بالقانون التالي:

$$D = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2} \quad (6.5)$$

٥-١-١ الخطأ في موقع العقدة:

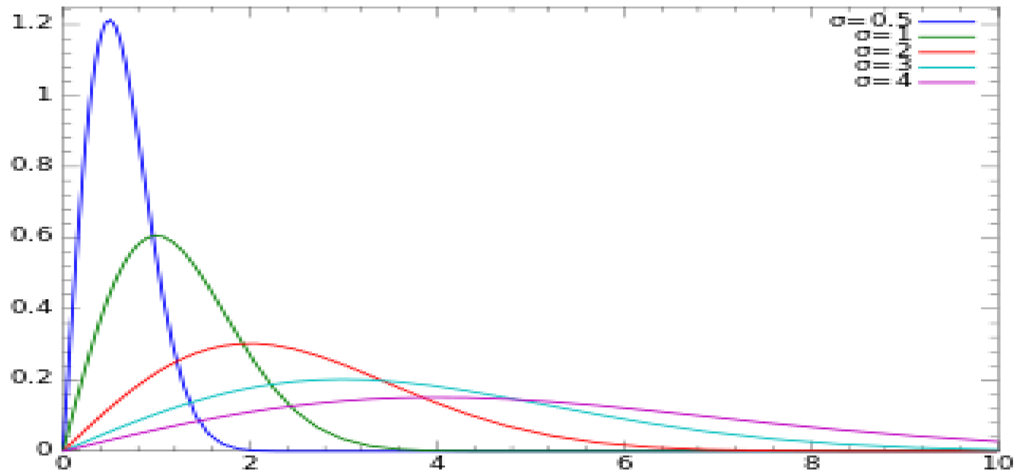
الخطأ في موقع عقدة ما P_i، والذي يمثل المسافة بين الموقع الحقيقي للعقدة والموقع الذي تم قياسه باستخدام تقنيات تحديد الموقع هو:

$$E_i = \sqrt{(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2}$$
$$= \sqrt{w_i^2 + w_j^2} = z \qquad (7.5)$$

حسب [76] فإن $E_i = z$ يمثل متحول عشوائي يتبع توزيع Rayleigh بتابع كثافة احتمالي:

$$f(z) = \frac{z}{\sigma_i^2} e^{\frac{-z^2}{2\sigma_i^2}} \quad (8.5)$$

يوضح الشكل (٣.٥) تابع الكثافة الاحتمالي لهذا التوزيع.



شكل (٣.٥) تابع الكثافة الاحتمالية لتوزيع Rayleigh

٥-١-٢ تابع الكثافة الاحتمالي للمسافة الحقيقية بين عقدتين:

يمكن حساب تابع الكثافة الاحتمالية للمسافة الحقيقية بين عقدتين P_i و P_j كالتالي:

$$z = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

وبحسب (2.5) و (3.5) و (4.5) و (5.5):

$$= \sqrt{(x_i - x_j + w_i - w_j)^2 + (y_i - y_j + w_i - w_j)^2} \; (9.5)$$

وبحسب [76] فإن : $w = w_i - w_j$ هو عبارة عن متحول عشوائي طبيعي بمتوسط يساوي الصفر وبانحراف معياري $(\sigma^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2)$.

وبالتبديل في (9.5):

$$z = \sqrt{(x_i - x_j + w)^2 + (y_i - y_j + w)^2} \; (10.5)$$

من الشكل (٢.٥) نجد أنّ:

$$x_i - x_j = \eta_{ij} \cos\theta \; (11.5)$$

$$y_i - y_j = \eta_{ij} \sin\theta \; (12.5)$$

حيث η_{ij} هي المسافة بين الموقعين اللذين تمّ قياسهما للعقدتين والمعطى بالعلاقة :

$$\eta_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \; (13.5)$$

و θ هي الزاوية بين المحور OX و العقدة P_j.

بتعويض (11.5) و (12.5) في (10.5) نجد:

$$z = \sqrt{(\eta_{ij}\cos\theta + w)^2 + \left(\eta_{ij}\sin\theta + w\right)^2} \quad (14.5)$$

وبحسب [75] فإن $a = \eta_{ij}\cos\theta + w$ هو عبارة عن متحول عشوائي طبيعي بانحراف معياري $(\sigma_a^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2)$ ومتوسط $(\mu = \eta_{ij}\cos\theta)$.

$$a \sim N(\eta_{ij}\cos\theta\,, \sigma_i^2 + \sigma_j^2) \; (15.5)$$

أيضاً فإن $b = \eta_{ij}\sin\theta + w$ هو عبارة عن متحول عشوائي طبيعي بانحراف معياري $(\sigma_b^2 =$ $\sigma_i^2 + \sigma_j^2)$ ومتوسط $(\mu = \eta_{ij}\sin\theta)$.

$$b \sim N(\eta_{ij}\sin\theta\,, \sigma_i^2 + \sigma_j^2) \; (16.5)$$

بتعويض (15.5) و (16.5) في (14.5) نجد:

$$z = \sqrt{a^2 + b^2} \; (17.5)$$

وبالتالي فإن المسافة الحقيقية بين عقدتين (z) هي عبارة عن متحول عشوائي يخضع لتوزيع (Rician) بتابع كثافة احتمالي:

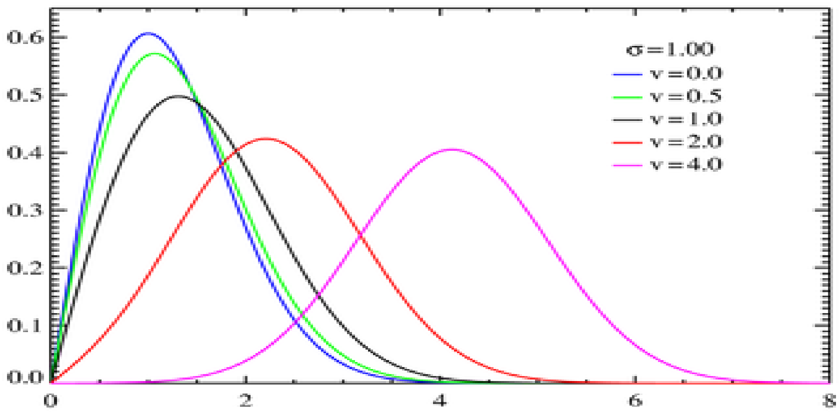
$$f(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-\frac{z^2+\eta_{ij}{}^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{z\eta_{ij}}{\sigma^2}\right) \; (18.5)$$

حيث I_0هو تابع Bessel المعدّل من النوع الأول والدرجة صفر، ويعطى بالعلاقة التالية:

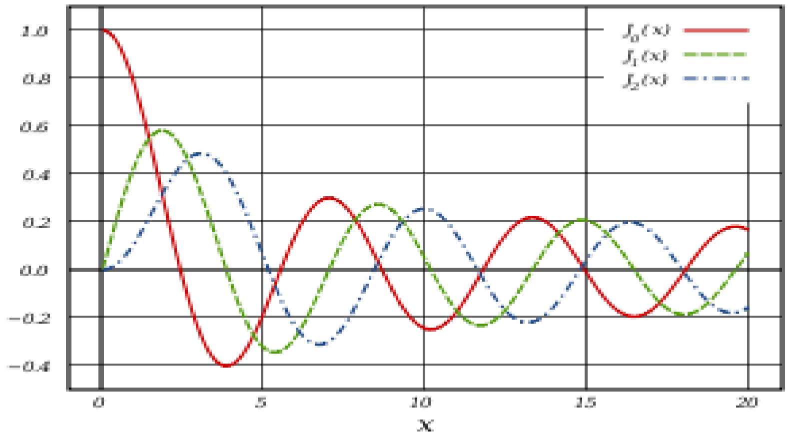
$$I_0(x) = \int_0^{\pi} e^{x\cos\theta}\, dx \; (19.5)$$

و (σ) هو الانحراف المعياري معطى بالعلاقة :

$$\sigma^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 \; (20.5)$$



شكل (٤.٥) تابع الكثافة الاحتمالية لتوزيع Rician



شكل (٥.٥) تابع Bessel المعدّل من النوع الأول

٥-٢ الفشل في الإرسال:

تفترض معظم الدراسات أن نمط إرسال العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية كروي ومتماثل، وتعرّف العقدة الجارة بأنها العقدة التي تقع ضمن نصف قطر إرسال العقدة الحالية. لكن في الواقع نمط الإرسال ليس كروياً بشكل تام، بالإضافة إلى أن الشبكة من الممكن أن تتكون من عقد غير متجانسة من حيث مدى الإرسال، ويعود هذا الانعدام في التجانس إلى أحد السببين التاليين:

- استخدام عقد غير متجانسة من حيث مدى الإرسال أثناء نشر عقد الشبكة.
- استخدام عقد متجانسة من حيث مدى الإرسال أثناء نشر عقد الشبكة، لكن النموذج غير المتماثل لاستهلاك الطاقة في العقد مع مرور الزمن، والناتج عن اختلاف توزيع العبء عليها، أدى لنشوء عدم التجانس في مدى إرسال هذه العقد.

مع وجود عدم التجانس في مدى إرسال العقد، فإنه حتى لو كانت العقدة الحالية ضمن مدى إرسال العقدة الجارة فإنه من الممكن أن لا تكون العقدة الجارة ضمن مدى إرسال العقدة الحالية. يحدث الفشل في الإرسال عندما يختار بروتوكول التوجيه الجغرافي إحدى العقد الجارة التي تقع فعلياً خارج مدى إرسال العقدة المصدر كعقدة وجهة، ولحساب احتمال هذا الخطأ:

بفرض لدينا العقدة v_i تريد ارسال رزمة إلى العقدة v_j (تم اختيار العقدة v_j كالعقدة التالية باتجاه المصرف)، احتمال فشل إرسال هذه الرزمة هو:

$$P\{transmission\ failure\ at\ node\ j\} = P\ \{\ Z > r_i\}\ (21.5)$$

حيث r_i هو مدى الارسال الخاص بالعقدة v_i وبالتالي :

$$P = \int_{r_i}^{\infty} f(z)\, dz$$

$$P = \int_{r_i}^{\infty} \frac{z}{\sigma^2} e^{-\frac{z^2+\eta_{ij}^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{z\eta_{ij}}{\sigma^2}\right) dz \quad (22.5)$$

نجري التحويل التالي : $z = \sigma x$ وبالتالي $x = \frac{z}{\sigma}$ و $\mathrm{dz} = \sigma \mathrm{dx}$

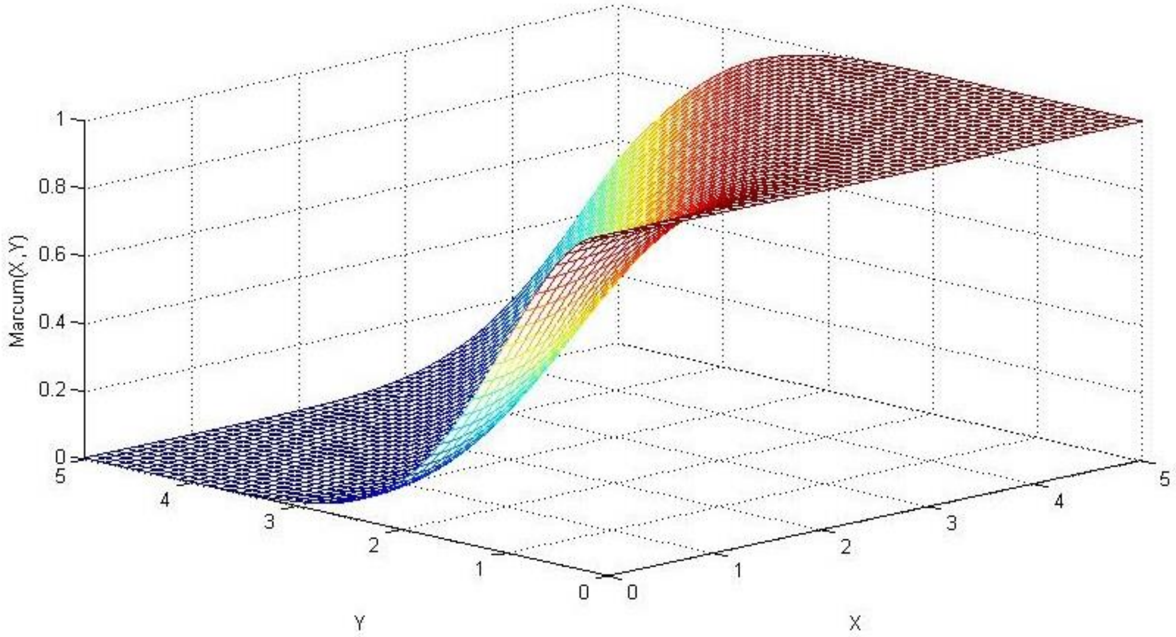
وبالتعويض في (22.5) نجد:

$$P = \int_{\frac{r_i}{\sigma}}^{\infty} x\, e^{\left(\frac{-1}{2}\left(x^2+\frac{\eta_{ij}^2}{\sigma^2}\right)\right)} I_0\left(x\frac{\eta_{ij}}{\sigma}\right) dx$$

$$P = Q_1\left(\frac{\eta_{ij}}{\sigma}, \frac{r_i}{\sigma}\right) \quad (23.5)$$

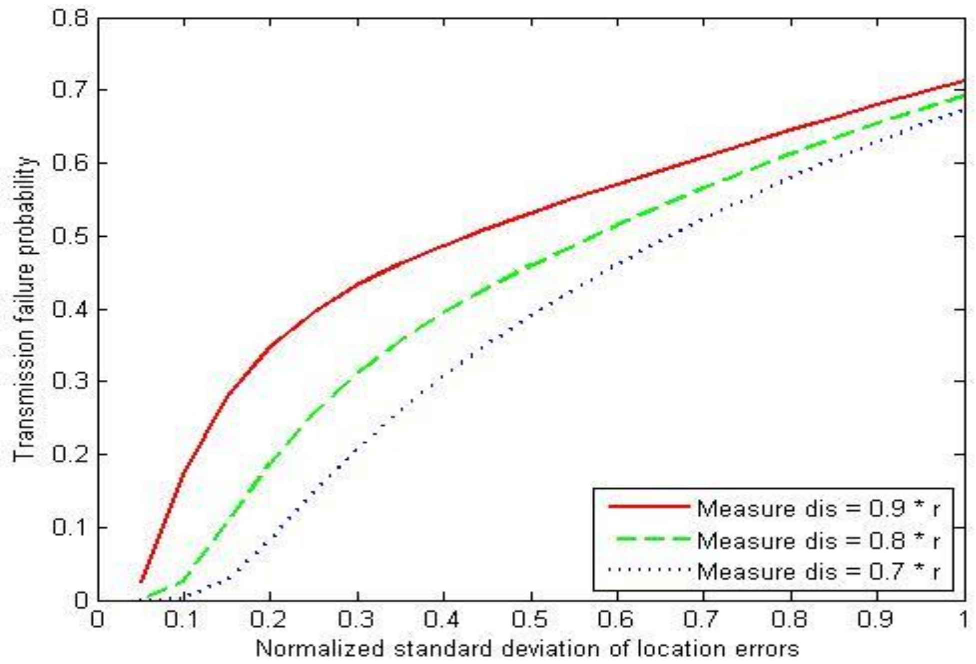
العلاقة (23.5) تمثل تابع Marcum من أجل m=1، والذي شكله العام كالتالي:

$$Q_m(\propto, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} x^m e^{-\left(\frac{x^2+\propto^2}{2}\right)} I_{m-1}(x \propto) dx$$

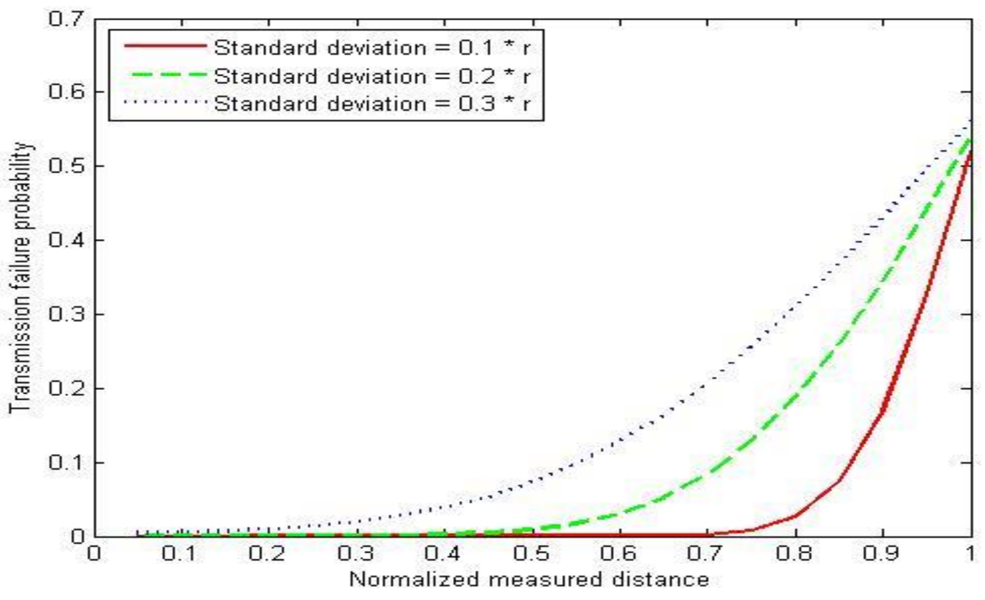


شكل (٦.٥) تابع Marcum من الدرجة الأولى

حسب الشكل البياني لتابع Marcum الموضح بالشكل (٦.٥)، فإن احتمال فشل عملية الإرسال يزداد بازدياد الانحراف المعياري للخطأ في الموقع. في حال الانحراف المعياري ثابت، والعقدة الوجهة قريبة من طرف مدى إرسال العقدة المصدر، فإن احتمال فشل عملية الإرسال يزداد، وزيادة مدى الإرسال الخاص بالعقدة يقلل من احتمال فشل عملية الإرسال.



شكل (٧.٥) احتمال الفشل في الإرسال بالنسبة للانحراف المعياري



شكل (٨.٥) احتمال الفشل في الإرسال بالنسبة للمسافة المقاسة بين العقد

يوضح الشكل (٧.٥) العلاقة بين احتمال الفشل في الإرسال و الانحراف المعياري، وذلك بالنسبة لعدة قيم للمسافة المقاسة بين العقد بدلالة نصف قطر الإرسال، أما الشكل(٨.٥) فيظهر العلاقة بين احتمال الفشل بالإرسال والمسافة المقاسة بين العقد، وذلك بالنسبة لعدة قيم للانحراف المعياري بدلالة نصف قطر

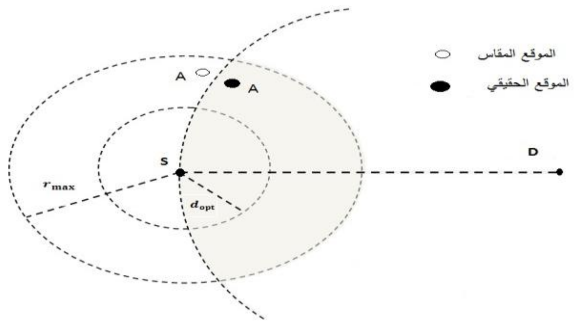
الإرسال. ، يبيّن الشكلان أن احتمال الفشل في الإرسال يزداد بازدياد الانحراف المعياري وباقتراب المسافة المقاسة بين العقد من حافة نصف قطر الإرسال وهذا ما يتوافق مع خصائص تابع Marcum التي تم ذكرها سابقاً [78].

٥-٣ أثر الخطأ في الموقع على بروتوكولات التوجيه الجغرافية:

يمكن توضيح أثر الأخطاء في الموقع على بروتوكولات التوجيه الجغرافية من خلال بعض الأمثلة التالية:

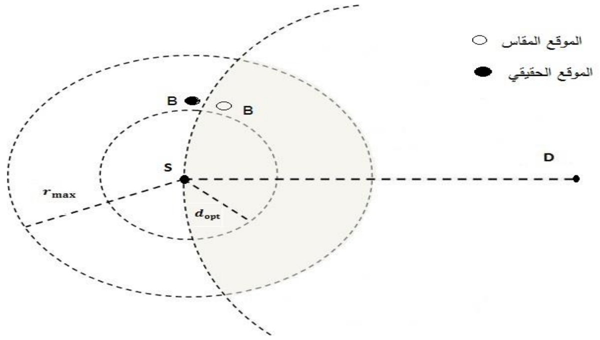
في جميع هذه الحالات لدينا العقدة (S) هي العقدة المصدر، ولديها بيانات تريد إيصالها للعقدة (D) التي تمثل العقدة الوجهة.

١- عندما تقع العقدة التالية ضمن منطقة التقدّم (Forwarding region) المظلّلة كما هو موضّح في الشكل (٩.٥)، ولكن عقدة المصدر تعتقد أنها خارج هذه المنطقة، وبالتالي تقرر عدم إرسال البيانات إليها. من الممكن أن ينتج عن هذه الحالة نهاية أعظمية محلّية خاطئة تسبب إما فشل عملية التوجيه، أو استخدام إجرائية إصلاح (Recovery method) تستهلك كمّية إضافية من الطاقة كان من الممكن تجنّب هدرها. يزداد احتمال وقوع هذه الحالة إذا كانت كثافة العقد في الشبكة قليلة.



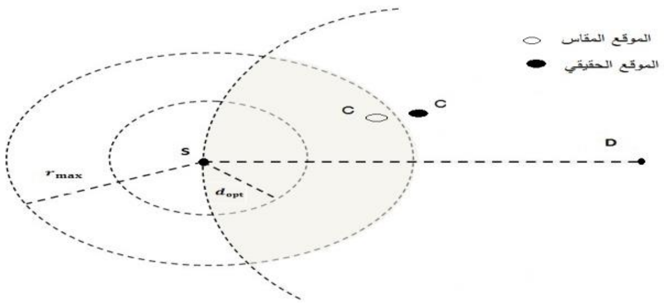
شكل (٩.٥) الحالة الأولى

٢- عندما تكون العقدة التالية خارج منطقة التقدّم، ولكن عقدة المصدر تعتقد أنها داخل هذه المنطقة، وبالتالي تتخذ قراراً بإرسال البيانات إليها، ينتج عن ذلك تقدّم عكسي (Backward progress) على جانب منطقة التقدّم كما هو موضح بالشكل (١٠.٥)، وبالتالي زيادة في استهلاك الطاقة.



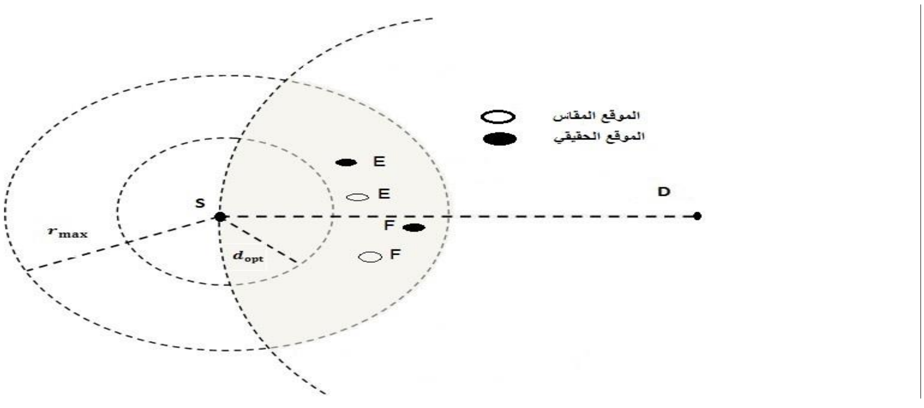
شكل (١٠.٥) الحالة الثانية

٣- عندما تكون العقدة التالية قريبة من حافة منطقة الإرسال وخارجها، ولكن عقدة المصدر تعتقد أنها داخلها، ينتج عن ذلك فشل عملية الإرسال كما هو موضح بالشكل(١١.٥)، وبالتالي استهلاك مقدار زائد من الطاقة.



شكل (١١.٥) الحالة الثالثة

٤- تؤثر الأخطاء في الموقع على الاختيار الأمثل للعقدة التالية، بالتالي يتم اختيار عقدة تالية غير أمثلية في ظلِّ وجود خيارٍ أفضل كما هو موضح بالشكل(١٢.٥)، وهذا ما يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة.



شكل (١٢.٥) الحالة الرابعة

الفصل السادس: المحاكاة والنتائج

لتقيم استهلاك الطاقة في بروتوكولات التوجيه الجغرافية سيتم محاكاة بروتوكولي توجيه جغرافيين GeRaf و MECF باستخدام برنامج Matlab. يعتمد هذين البروتوكولين على تقنية التقدّم الطامع في تسيير البيانات من المصدر إلى الوجهة. تم اختيار هذين البروتوكولين لأنهما يعتمدان استراتيجيتين مختلفتين في اختيار العقدة التالية باتجاه المصرف. يقوم بروتوكول GeRaf باختار الجار المباشر الأقرب للوجهة والذي يحقق أكبر تقدّم باتجاه المصرف كعقدة تالية في المسار من المصدر إلى المصرف، في حين بروتوكول MECF يختار الجار المباشر الأقرب للمصدر والذي يحقق تقدّم باتجاه المصرف كعقدة تالية في المسار من المصدر إلى الوجهة. ستتم المحاكاة وفق الحالتين التاليتين:

- الحالة الأولى: سيتم مقارنة استهلاك الطاقة للبروتوكولين بدون وجود أخطاء في مواقع العقد.
- الحالة الثانية: سيتم مقارنة استهلاك الطاقة للبروتوكولين بوجود أخطاء في مواقع العقد.

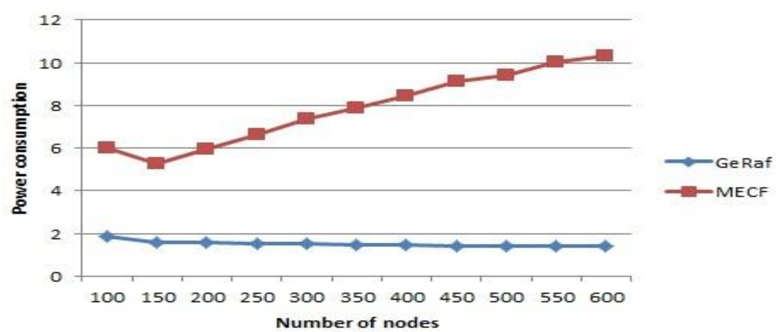
سيتم في هذه المحاكاة استخدام شبكة بطول وعرض 100 متر، تحتوي حساسات ثابتة، موزّعة بشكل عشوائي. العقدة المصدر والعقدة الوجهة تتموضعان في النقطتين (0.0) و (100.100) على الترتيب. تتكون الشبكة من حساسات متماثلة بمدى إرسال أعظمي 20 متر. الطاقة المستهلكة من قبل الدارات الالكترونية للمرسلات اللاسلكية لإرسال خانة واحدة هي $\varepsilon_{\text{elec}} = 50\ \text{nJ/bit}$ والثابت الخاص بخفوت الإشارة ضمن الوسط $\beta = 100\ \text{pJ/ bit/m}^2$ [77]. سيتم توليد تدفّق بحجم (2Kb) من العقدة المصدر، ومن أجل كل عملية إرسال بين العقد (سيتم تسميتها قفزة) سيتم احتساب مقدار الطاقة اللازمة للمعالجة والإرسال في طرف الإرسال ومقدار الطاقة اللازمة للمعالجة والاستقبال في طرف الاستقبال.

$$E = 2 * \varepsilon_{\text{elec}} * PS + PS * \beta * d^{\alpha} \qquad (1.6)$$

حيث: d المسافة بين العقدتين، α ثابت يساوي (2) للاتصالات اللاسلكية قصيرة المدى، β والثابت الخاص بخفوت الإشارة ضمن الوسط، PS حجم البيانات في حالتنا (2Kb)، $\varepsilon_{\text{elec}}$ الطاقة المستهلكة من قبل الدارات الالكترونية للمرسلات اللاسلكية لإرسال خانة واحدة، وتم الضرب بـ (2) لأن هذه الطاقة مستهلكة في طرفي الإرسال والاستقبال. سيتم مراكمة مقدار الطاقة المستهلكة في عقد الشبكة لإيصال هذا التدفق من المصدر إلى المصرف. سيتم تكرار المحاكاة من أجل الأعداد التالية من العقد في الشبكة (100، 150، 200، 250، 300، 350، 400، 450، 500، 550، 600).

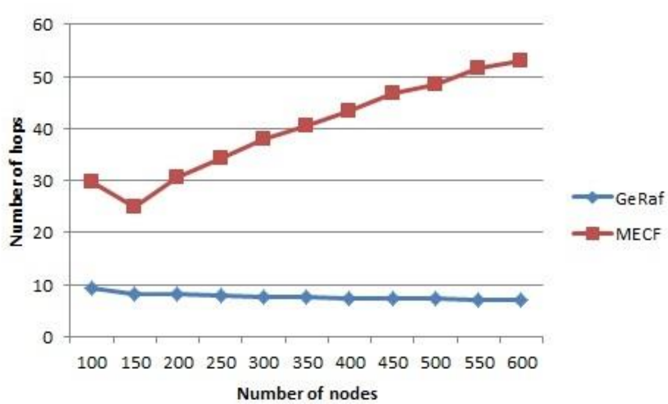
٦-١ الحالة الأولى:

في هذه الحالة، يكون استهلاك الطاقة لبروتوكول GeRaf عالي نسبياً عندما تكون كثافة العقد في الشبكة منخفضة، وينخفض هذا الاستهلاك مع ازدياد عدد عقد الشبكة وذلك لأن GeRaf يختار أحد الجيران المباشرين الأقرب للوجهة كعقدة تالية. في حين MECF يختار الجار المباشر الأقرب للمرسل والذي يحقق تقدّم باتجاه الوجهة كعقدة تالية، ولذلك يزداد استهلاك الطاقة بازدياد عدد العقد في الشبكة، كما هو موضح بالشكل(٦-١).



شكل(٦-١) العلاقة بين استهلاك الطاقة و عدد العقد

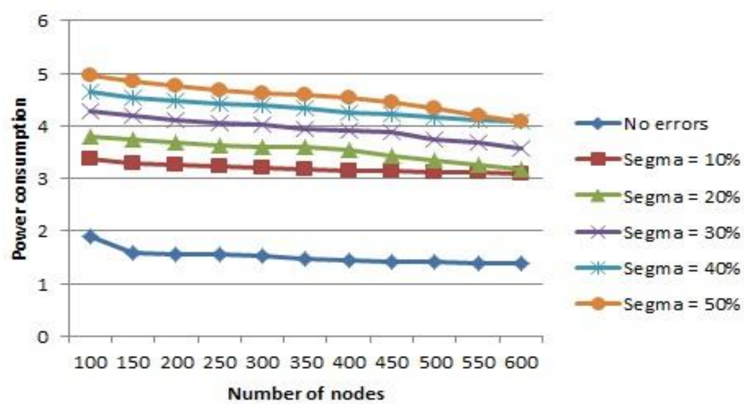
يوضح الشكل (٦-٢) أن عدد القفزات في بروتوكول MECF يزداد تقريبياً بشكل خطي بازدياد عدد العقد في الشبكة، في حين عدد القفزات في GeRaf ينخفض مع ازدياد عدد العقد في الشبكة [78].



شكل(٦-٢) العلاقة بين عدد القفزات وعدد العقد

٦-٢ الحالة الثانية:

في هذه الحالة سيتم إدخال أخطاء في مواقع العقد، هذه الأخطاء عبارة عن متحولات عشوائية تخضع للتوزيع الطبيعي، بمتوسط صفري وانحراف معياري σ، سيتم التعبير عنه كنسبة مئوية من مدى الإرسال. سيتم توليد هذه المتحولات بشكل عشوائي. يوضح الشكل(٦-٣) استهلاك الطاقة بوجود أخطاء في مواقع العقد لبروتوكول GeRaf، نلاحظ ازدياد استهلاك الطاقة بازدياد الانحراف المعياري للأخطاء في المواقع، وذلك بسبب أن هذا البروتوكول يقوم باختيار الجار المباشر الأقرب للوجهة كعقدة تالية، والتي تقع بالقرب من حافة منطقة الإرسال، وبالتالي يعاني هذا البروتوكول من احتمال عالي في الفشل في عملية الإرسال مما يسبب زيادة في استهلاك الطاقة. هذه النتائج تتوافق النموذج الرياضي الذي تم تطويره في الفصل الخامس، حيث أشار هذا النموذج إلى أن احتمال ازدياد استهلاك الطاقة يزداد بازدياد الانحراف المعياري للأخطاء، ويزداد عند اختيار بروتوكول التوجيه للعقد المجاورة لحافة منطقة إرسال العقدة المرسلة كعقد تالية ضمن المسار إلى المصرف.



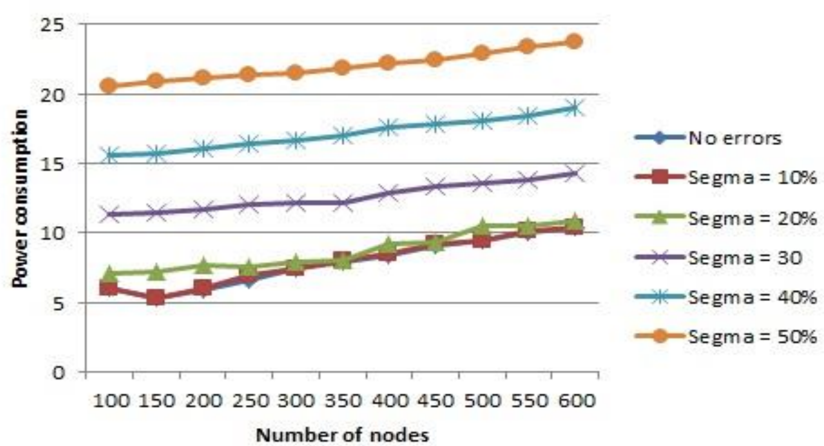
شكل(٦-٣) بروتوكول GeRaf، استهلاك الطاقة بالمقارنة مع عدد العقد بالنسبة لعدة قيم للانحراف المعياري

في الشكل(٦-٤) نجد أن بروتوكول MECF يستهلك تقريباً نفس المقدار من الطاقة وذلك عندما يكون الانحراف المعياري للأخطاء في مواقع العقد بين 0 و 20% من مدى الإرسال. هذه المناعة ضد الأخطاء الصغيرة في مواقع العقد ناتجة من كون هذا البروتوكول يختار الجار المباشر الأقرب للمرسل والذي يحقق تقدّم باتجاه الوجهة كعقدة تالية. بالرغم من وجود هذه المناعة ضد الأخطاء، إلا أنه من أجل قيم كبيرة

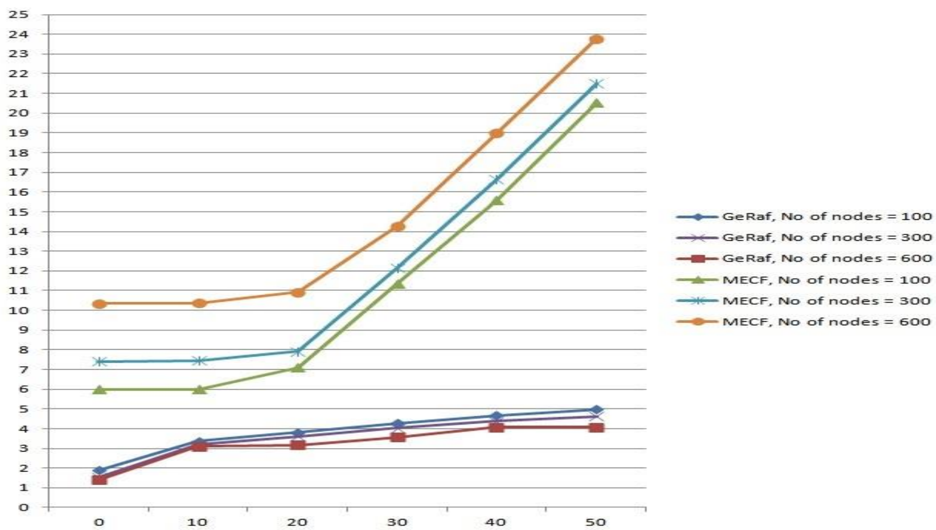
للانحراف المعياري في الأخطاء، نلاحظ ازدياد استهلاك الطاقة في هذا البروتوكول، وهذا ما يتوافق أيضاً مع نتائج النموذج الرياضي [78].

يبين الشكل(٦-٥) العلاقة بين مقدار استهلاك الطاقة للبروتوكولين والانحراف المعياري للأخطاء في مواقع العقد. نلاحظ أن بروتوكول GeRaf يملك حساسية عالية من الأخطاء في مواقع العقد، ،ان هذه الأخطاء حتى لوكان الانحراف المعياري الخاص بها بقيم صغيرة لا تتجاوز ١٠% من مدى الإرسال، فإنها تؤدي إلى مضاعفة استهلاك الطاقة من قبل هذا البروتوكول. نلاحظ أيضاً أن الأخطاء الصغيرة التي انحرافها المعياري أقل من ٢٠% من مدى الإرسال ليس لها أي أثر على استهلاك الطاقة ضمن بروتوكول MECF، في حين أن الأخطاء الأكبر تزيد استهلاك الطاقة ضمن هذا البروتوكول بشكل كبير [78].

بالرغم من أن بروتوكول GeRaf أكثر حساسية للأخطاء من بروتوكول MECF، إلا أن بروتوكول GeRaf يتفوق بالإداء على بوتوكول MECF من ناحية استهلاك الطاقة، وذلك سواءً بوجود أخطاء في مواقع العقد أو عدم وجود هذه الأخطاء [78].



شكل(٦-٤) بروتوكول MECF، استهلاك الطاقة بالمقارنة مع عدد العقد بالنسبة لعدة قيم للانحراف المعياري



شكل(٦-٥) العلاقة بين استهلاك الطاقة والانحراف المعياري للأخطاء

٦-٣ الخاتمة والأعمال المستقبلية:

تعتمد بروتوكولات التوجيه الجغرافية في اتخاذ قرار التوجيه على معلومات مواقع العقد مفترضةً أن هذه المعلومات دقيقة. لكن في التحقيقات الواقعية لهذه الشبكات يوجد أخطاء في مواقع العقد ناتجة عن عدّة أسباب منها خوارزمية تحديد الموقع وشروط الوسط وكثافة العقد...، و يجب عدم تجاهل هذه الأخطاء ضمن هذا النوع من البروتوكولات. قدمت هذه الدراسة نموذجاً رياضياً يساعد في فهم أثر هذه الأخطاء على استهلاك الطاقة في هذه البروتوكولات، ومن ثم تمّ التحقق من هذا النموذج باستخدام المحاكاة لبروتوكولي توجيه جغرافيين.

أظهرت نتائج المحاكاة كما النموذج الرياضي أن هذه البروتوكولات تعاني من زيادة في استهلاك الطاقة في حال وجود أخطاء في مواقع العقد. كما أظهرت نتائج المحاكاة أن بوتوكول GeRaf يعاني من حساسية عالية تجاه الأخطاء في مواقع العقد، حيث يمكن لقيم صغيرة لهذه الأخطاء أن تؤدي إلى مضاعفة استهلاك الطاقة. في الجانب الآخر أظهرت هذه النتائج أنه في بروتوكول MECF لا يتغير مقدار الطاقة المستهلكة

بوجود أخطاء صغيرة لا يتجاوز انحرافها المعياري ٢٠% من مدى الإرسال، ولكن مقدار استهلاك الطاقة يزداد بشكل كبير في حال وجدت أخطاء أكبر من ذلك.

لم يتم التطرق في هذا البحث لباقي مقاييس الأداء الخاصة ببروتوكولات التوجيه مثل معدّل تسليم الرزم والتأخير الزمني، والتي من الممكن دراستها بهدف تقديم رؤية شاملة عن أثر الأخطاء في مواقع العقد على أداء هذا النوع من بروتوكولات التوجيه، بالإضافة إلى أن النموذج الرياضي الذي تم تطويره يعتمد على مستوٍ ديكارتي، يتم تمثل كل نقطة ضمنه بإحداثيات على محورين. من الممكن مستقبلاً أن يتم توسيع هذه الدراسة بحيث يتم تمثيل كل نقطة بإحداثيات على ثلاثة محاور.

Abstract:

Location based routing, also known as geographical routing, is a routing technique that tries to achieve energy efficiency in wireless sensor networks. It is considered one of the best routing techniques in multi-hop wireless networks, in which nodes are subject to a unique set of resource constraints such as finite battery power. Location-based routing protocols use position information for making packet forwarding decisions, assuming that all nodes know their location using a localization algorithm across the network, or mutual measurements between each node, its direct neighbors, and anchor node. Location based routing protocols determine the path to send the traffic through by using the position information of the source, the direct neighbors of the source and the destination. As a result, very little routing information is needed and no energy is spent on route discovery, queries or replies. Node memory and computation requirements are decreased as well as the routing protocol's traffic overhead. In location-based routing, the process is localized and distributed so that all nodes are involved in the routing process, that allow this type of protocols to support large scale wireless sensor networks.

Location-based routing protocols use position information for making packet forwarding decisions, assuming perfect location information. However, in practice there could be significant errors in obtaining location estimates. There are many sources of location errors in the localization process. One of them is inaccurate measurement of distance or bearing due to sensing technique limitations or environment noise. Also, localization algorithms may cause errors due to the resource limitation of the sensors. There are many other factors that contribute to the final error in the localization process such as network density, uncertainties in anchor locations and anchor density.

In this thesis, the impact of location errors on power consumption of these protocols will be analyzed via developing a mathematical model represents the location errors that may occur in real deployment. Then a simulation of the power consumption of two location-based routing protocols, Geographic Random Forwarding (GeRaf) and Minimum Energy Consumption Forwarding (MECF) is carried out to evaluate the mathematical model. Both the obtained simulation results and the developed mathematical model show that this type of routing protocols suffers from substantial performance degradation in terms of power consumption in presence of location errors.

المصطلحات:

المعنى	المصطلح
المعالجات الصغرية	Microprocessor
القشرة الرقمية وهي مجموعة حساسات صغيرة الحجم ورخيصة الثمن موزعة على الطرقات والجدران والآلات تستطيع استشعار مختلف الظواهر الفيزيائية	Digital skin
العقدة المصرف	Sink
محرك ميكانيكي يضاف للحساسات ليمكنها من التفاعل مع الوسط	Actuator
المساعدات الشخصية الرقمية	PDA
العبارة	Gateway
معدل تسليم الرزم	Packet delivery ratio
كفاءة استهلاك الطاقة	Energy consumption efficiency
ارتباطية الشبكة	Network connectivity
عمر الشبكة	Network lifetime
نموذج الند للند للاتصال بين العقد	Peer to Peer
الاعتماد على الوسط لتوليد جزء من الطاقة اللازمة	Energy harvesting
كثافة العقد	Nodes density
قدرة الشبكة على الاستمرار	Maintainability
عدم تجانس عقد الشبكة	Heterogeneity
التنظيم الذاتي	Self-organization
المعالجة ضمن الشبكة	In network processing
مراكمة أو تجميع البيانات	Aggregation
سعة المعالجة أو الانتاجية	Node throughput
الترابط المكاني	Spatial correlation
الترابط الزماني	Temporal correlation
مركزية البيانات	Data centricity

Multi-hope wireless connection	الاتصالات اللاسلكية متعددة القفزات
Meta data	المعلومات عن هذه البيانات
Locality	المحلية
GPS	نظام تحديد المواقع العالمي
Beacon, Landmark, Anchor	العقد المرشدة وهي العقد التي تكون على معرفة مسبقة بموقعها ضمن نظام إحداثيات مطلق
Multilateration	تقنية لحساب الموقع بناءً على قياس المسافة الفاصلة عن عدة عقد مرشدة
Received signal strength indicator (RSSI)	مؤشر قوة الإشارة المستقبلة
(ToA) Time of arrival	زمن الوصول
(TDoA) Time difference of arrival	الفرق في زمن الوصول
Event Driven	مقاد بالأحداث
Query Driven	مقاد بالاستعلامات
Implosion	الانفجار االداخلي ضمن الشبكة والناتج عن وصول أكثر من نسخة من نفس الرزمة إلى إحدى العقد
Backward progress	التقدم العكسي ويحدث عند اتخاذ قرار توجيه ينتج عنه إرسال البيانات بعيداً عن المصرف عوضاً عن زيادة قربها إليه
Recovery method	إجرائية إصلاح ويعتمدها بروتوكول التوجيه عند الوصول إلى نهاية أعظمية محلية

المراجع:

[1]. HidayetAksu, DemetAksoy, and Ibrahim Korpeoglu, A study of localization metrics: Evaluation of position errors in wireless sensor networks, Computer Networks, Volume 55, Issue 15, 27 October 2011.

[2]. A. Savvides, W. Garber, R. Moses, M. Srivastava, An analysis of error inducing parameters in multihop sensor node localization, IEEE Transaction on mobile computing 2004.

[3]. Nicola Baldo, Albert F. Harris, Energy Efficient Routing Schemes for underwater acoustic networks, IEEE journal on selected area in communication December 2008.

[4]. Rahul C. Shah, Adam Wolisz and Jan Rabaey, "On the performance of geographical routing in the presence of localization errors", IEEE International Conference on Communications, 2005

[5]. Ana Maria Popescua, Ion Gabriel Tudorachea, Bo Pengb, A.H. Kempa, Surveying Position Based Routing Protocols for Wireless Sensor and Ad-hoc Networks, International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS) Vol. 4, No. 1, April 2012.

[6]. Shio Kumar Singh, M P Singh, and D K Singh, Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, A Survey, International Journal of Computer Science & Engineering November 2010.

[7]. L.Doherty, B.A.Warneke, B.E.Boser, and K.Pister. Energy and performance considerations for smart dust. International Journal of Parallel Distributed Systems and Networks, 121-133, 2001

[8]. A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, September 2002

[9]. K. R¨omer, O. Kasten, and F. Mattern. Middleware Challenges for Wireless Sensor Networks. ACMMobile Communication and Communications Review, 59–61, 2002.

[10]. D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next Century Challenges: Scalable Coordinationin Sensor Networks. In Proceedings of the

Fifth Annual International Conference on Mobile Computingand Networks (MobiCom 1999), Seattle, Washington, DC, 1999.

[11]. P. Gupta and P. R. Kumar. The Capacity of Wireless Networks. IEEE Transactions on Information Theory, 388–404, 2000.

[12]. Z. Xiong, A. Liveris, and S. Cheng. Distributed Source Coding for Sensor Networks. IEEE SignalProcessing Magazine (Special Issue on Signal Processing for Networks), 80–94.

[13]. D. Slepian and J. K. Wolf. Noiseless Coding of Correlated Information Sources. IEEE Transactions on Information Theory, 471–480, 1973.

[14]. Patrick Th. Eugster, Pascal A. Felber, RachidGuerraoui, and Anne MarieKermarrec. The Many Faces of Publish/Subscribe. ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 2, June 2003, 114–131.

[15]. Uroš M. Pešović, Jože J. Mohorko, Karl Benkič, Žarko F. Čučej, Single-hop vs. Multi-hop Energy efficiency analysis in wireless sensor networks, Telekomunikacioni forum TELFOR 2010.

[16]. J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Patel, and S. Roundy. PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. *IEEE Computer*, 42–48, 2000.

[17]. Samir Goel, Tomasz Imielinski, KaanOzbay, BadriNath, Sensors on wheels, towards a zero-infrastructure solution for intelligent transportation systems, TRB 2004 Annual Meeting.

[18]. Anna Scaglione,Sergio D. Servetto, On the Interdependence of Routing and Data Compression in MultiHop Sensor Networks, MOBICOM’02, September 23–26, 2002

[19]. Samira Afzal, A Review of Localization Techniques for Wireless Sensor Networks, Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2012.

[20]. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. Global Positioning System: Theory and Practice. Springer, 4th edition, 1997.

[21]. 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.

[22]. A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. A New Location Technique for the Active Office. IEEE Personal Communications, 4(5): 42–47, 1997.

[23]. K. Whitehouse and D. Culler. Calibration as Parameter Estimation in Sensor Networks. In Proceedints of the 1st ACM International Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, September 2002.

[24]. N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann. Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Communiation Theory and Applications, Ambleside, Lake District, UK, July 2001.

[25]. 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.

[26]. R. Want, A. Hopper, V. Fal˜ao, and J. Gibbons. The Active Badge Location System. ACM Transactions on Information Systems, 10(1): 91–102, 1992.

[27]. 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.

[28]. 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.

[29]. 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.

[30]. 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.

[31]. 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.

[32]. D. Niculescu and B. Nath. Ad Hoc Positioning System (APS). In Proceedings of IEEE GlobeCom, San Antonio, AZ, November 2001.

[33]. 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.

[34]. F. Ye et al., A two-tier data dissemination model for large scale wireless sensor networks, in: Proceedings of Mobicom 02, Atlanta, GA, September, 2002.

[35]. S. Tilak et al., A taxonomy of wireless micro sensor network models, Mobile Computing and Communications Review 6 (2) (2002) 28–36

[36]. W. Heinzelman, Application specific protocol architectures for wireless networks, PhD Thesis, MIT, 2000.

[37]. R.H. Katz, J.M. Kahn, K.S.J. Pister, Mobile networking for smart dust, in: Proceedings of the 5th Annual ACM/ IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom99), Seattle, WA, August 1999.

[38]. C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks, in: Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom00), Boston, MA, August 2000.

[39]. D. Estrin et al., Next century challenges: scalable coordination in sensor networks, in: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom99), Seattle, WA, August 1999.

[40]. L. Subramanian, R.H. Katz, An architecture for building self-configurable systems, in: Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, August 2000.

[41]. M. Younis, M. Youssef, K. Arisha, Energy-aware routing in cluster-based sensor networks, in: Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), Fort Worth, TX, October 2002.

[42]. W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks, in: Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.

[43]. S. Lindsey, C.S. Raghavendra, PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems, in: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 2002.

[44]. S. Lindsey, C.S. Raghavendra, K. Sivalingam, Data gathering in sensor networks using the energy delay metric, in: Proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.

[45]. K. Akkaya, M. Younis, An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks, in: Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN 2003), Providence, RI, May 2003.

[46]. B. Krishnamachari, D. Estrin, S. Wicker, Modeling data centric routing in wireless sensor networks, in: Proceedings of IEEE INFOCOM, New York, June 2002.

[47]. Y. Yao, J. Gehrke, The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, in: SIGMOD Record, September 2002.

[48]. C. Schurgers, M.B. Srivastava, Energy efficient routing in wireless sensor networks, in: The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.

[49]. W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, in: Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom99), Seattle, WA, August 1999.

[50]. D. Braginsky, D. Estrin, Rumor routing algorithm for sensor networks, in: Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.

[51]. M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, Scalable information driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks, The International Journal of High Performance Computing Applications 16 (3) (2002) 293– 313.

[52]. A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, in: Proceedings of the 1st

International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.

[53]. R. Shah, J. Rabaey, Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks, in: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, FL, March 2002.

[54]. N. Sadagopan et al., The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, in: Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, AK, May 2003.

[55]. S. Hedetniemi, A. Liestman, A survey of gossiping and broadcasting in communication networks, Networks 18 (4) (1988) 319–349.

[56]. D. Ganesan et al., Highly resilient, energy efficient multipath routing in wireless sensor networks, Mobile Computing and Communications Review 5 (4) (2002) 11–25.

[57]. A. Buczak, V. Jamalabad, Self-organization of a heterogeneous sensor network by genetic algorithms, in: C.H. Dagli et al. (Eds.), Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, vol. 8, ASME Press, New York, 1998, pp. 259–264.

[58]. C.R. Lin, M. Gerla, Adaptive clustering for mobile wireless networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 15 (7) (1997) 1265–1275.

[59]. A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks, in: Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, Ft. Lauderdale, FL, April 2002.

[60]. M. Youssef, M. Younis, K. Arisha, A constrained shortest path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks, in: Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networks Conference (WCNC2002), Orlando,FL, March 2002.

[61]. M. Younis, P. Munshi, E. Al-Shaer, Architecture for efficient monitoring and management of sensor networks, in: Proceedings of the IFIP/IEEE Workshop on End-to- End Monitoring Techniques and Services (E2EMON03), Belfast, Northern Ireland, September 2003.

[62]. Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, Geography-informed energy conservation for ad hoc routing, in: Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom01), Rome, Italy, July 2001.

[63]. Seada, K.; Zuniga, M.; Helmy, A.; Krishnamachari, B. Energy-Efficient Forwarding Strategies for Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, USA, November, 2004; pp. 108–121.

[64]. Karl, H.; Willig, A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex, UK, 2005.

[65]. Hannes Frey, Ivan Stojmenovic, On Delivery Guarantees of Face and Combined Greedy-Face Routing in Ad Hoc and Sensor Networks, MobiCom'06, September 23–26, 2006, Los Angeles, California, USA.

[66]. Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin,\Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001, pp. 70-84.

[67]. Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, \Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.

[68]. Michele Zorzi, Ramesh R. Rao, Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 2, n. 4, Oct.-Dec. 2003.

[69]. Bighnaraj Panigrahi, Swades De, and Jean-Daniel Lan Sun Luk, A Greedy Minimum Energy Consumption Forwarding Protocol for Wireless Sensor Networks, Communication Systems and Networks and Workshops 2009, COMSNETS 2009, First International, pp. 1 - 6,Jan. 2009.

[70]. J.-H. Chang, L. Tassiulas, Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, in: Proceedings of the Advanced Telecommunications and Information Distribution Research Program (ATIRP'2000), College Park, MD, March 2000.

[71]. K. Kalpakis, K. Dasgupta, P. Namjoshi, Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks, in: Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS'02), Atlanta, GA, August 2002.

[72]. I.F. Akyildiz et al., Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks 38 (4) (2002) 393–422.

[73]. K. Sohrabi et al., Protocols for self-organization of a wireless sensor network, IEEE Personal Communications 7 (5) (2000) 16–27.

[74]. T. He et al., SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks, in: Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, May 2003.

[75]. A. Papoulis, S.U. Pillai, Probability, Random Variables and StochasticProcesses, McGraw-Hill, 2002.

[76]. Durrett R. Probability - Theory and Examples, Second edition.

[77]. Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, Hari Balakrishnan, An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, pp. 660-670, October 2002.

[78]. Iyad Alkhayat , Mohsen Kadi, The effect of location errors on location based routing protocols in wireless sensor networks, Volume 16, Issue 1, March 2015, pp. 113–119

Ministry of Higher Education

Damascus University

Faculty of Information technology

Operating Systems and Networks Department

Energy efficiency of location-based routing protocols in wireless sensor networks

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master Degree in Operating Systems and Networks

By

Eng. Mohsen Ali Kadi

Supervisor

Dr. Iyad Alkhayat

2015

الملخص:

يظهر التوجيه المعتمد على مواقع العقد Location-based routing (أو ما يعرف بالتوجيه الجغرافي Geographical routing) بين العديد من تقنيات التوجيه التي تهدف إلى استهلاك الطاقة بشكل فعّال ضمن شبكات الحساسات اللاسلكية. يعتبر التوجيه الجغرافي من أفضل الحلول الممكنة للتوجيه في الشبكات اللاسلكية المتعددة القفزات التي تعاني مكوناتها من محدودية في مصادر الطاقة. تفترض هذه البروتوكولات أن كل العقد في الشبكة على معرفة دقيقة بموقعها ضمن الشبكة وذلك باستخدام خوارزميات تحديد موقع عبر الشبكة أو بالاعتماد على عمليات قياس متبادلة بين كل عقدة وجيرانها المباشرين والعقد المرشدة. عندما يكون لدى إحدى العقد بعض الرزم الواجب إرسالها للعقدة المصرف، ستقوم باختيار العقدة التالية باتجاه المصرف بالاعتماد على موقعها و مواقع جيرانها المباشرين و موقع العقدة المصرف، بالتالي فإن جميع العمليات في هذه البروتوكولات محلّية. هذه الميزة تمكّن هذا النوع من البروتوكولات من التوسّع بشكل كبير بحيث تدعم الشبكات المكونة من عدد كبير من العقد. يعتبر هذا النوع من البروتوكولات مناسباً لعمل شبكات الحساسات اللاسلكية وذلك لعدم وجود الحاجة لإنشاء المسارات وحفظها في جداول التوجيه ضمن عقد الشبكة، بإضافة إلىالاستقلال عن التغيرات البعيدة التي تحصل في طبولوجيا الشبكة .

إن اعتماد هذه البروتوكولات على معلومات مواقع العقد فقط لاتخاذ قرار التوجيه يفرض أن تكون هذه المعلومات متاحة ودقيقة بشكل كبير جداً. يوجد العديد من العوامل التي تؤثر على عملية تحديد مواقع العقد في شبكات الحساسات اللاسلكية، من هذه العوامل عدم دقة قياس المسافة بين العقد، وكثافة العقد ضمن الشبكة و كثافة العقد المرشدة ضمن الشبكة ومستوى الضجيج ضمن الوسط. تؤدي هذه العوامل إلى وجود أخطاء في مواقع العقد، تمثل هذه الأخطاء انزياح لموقع العقدة المقاس عن الموقع الحقيقي للعقدة. تقدّم هذه الدراسة تقييم لأثر هذه الأخطاء على استهلاك الطاقة ضمن بروتوكولات التوجيه الجغرافية في شبكات الحساسات اللاسلكية وذلك باستخدام نموذج رياضي تم تطويره لتمثيل هذه الأخطاء، ومن ثم تم التحقق من صحة هذا النموذج الرياضي باستخدام المحاكاة لبروتوكولي توجيه جغرافيين هما: GeRaf (Geographical Random Forwarding) و MECF (Minimum Energy Consumption Forwarding)، وقد أظهرت نتائج المحاكاة كما النموذج الرياضي أن هذه البروتوكولات تعاني من زيادة في استهلاك الطاقة وذلك في حال وجود أخطاء في مواقع العقد وهي الحالة الأقرب للتحقيقات الواقعية لهذه الشبكات.