***A Wireless Sensor Network Coverage Optimization Algorithm Based on Particle Swarm Optimization and Voronoi Diagram***

**Algoritmo de optimización de cobertura de red de sensores inalámbricos basado en optimización de enjambre de partículas y diagrama de Voronoi**  
  
Introducción  
  
WSN es un grupo de nodos de sensores inalámbricos de bajo costo, bajo consumo de energía, multifuncionales y de pequeño tamaño que trabajan juntos para detectar el entorno, realizar un procesamiento de datos simple y comunicarse de forma inalámbrica a corta distancia [1]. Algunos de estos nodos sensores pueden moverse por sí mismos. La movilidad se logra mediante el montaje de los sensores en plataformas móviles como Robomote [2]. Con la capacidad de moverse de forma independiente, estos sensores móviles pueden auto desplegarse y repararse, lo que agrega más a su valor [3]. En general, las aplicaciones de WSN se pueden dividir en servicios militares, civiles y de salud [4]. Entre el uso militar de WSN se encuentran el sistema de objetivos y la vigilancia en el campo de batalla. Para la aplicación civil, WSN puede aplicarse en monitoreo de tráfico, monitoreo ambiental, monitoreo y control de edificios, monitoreo de vida silvestre, seguridad, sistema de agricultura inteligente y muchas otras aplicaciones. En el cuidado de la salud, WSN se puede usar para monitorear los signos vitales de pacientes con enfermedades críticas y también es muy útil en el cuidado de ancianos donde además de monitorear sus signos vitales, los sensores se pueden usar para rastrear sus ubicaciones.  
  
Sin embargo, estos sensores inalámbricos tienen varias limitaciones, como la detección restringida y el rango de comunicación, así como la capacidad limitada de la batería [5]. Las limitaciones plantean varios problemas que incluyen cobertura, conectividad, vida útil de la red, programación y agregación de datos. Para prolongar la vida útil de WSN, se deben tomar medidas de conservación de energía como la programación y la agregación de datos. La programación conserva la energía apagando los sensores siempre que sea posible, mientras que la agregación de datos intenta conservar la energía reduciendo la energía utilizada en la transmisión de datos. Los problemas de conectividad y cobertura provienen de una comunicación limitada y un rango de detección de los sensores involucrados. Para garantizar la conectividad, los sensores deben colocarse lo suficientemente cerca el uno del otro para que estén dentro del rango de comunicación.  
  
Por otro lado, el problema de cobertura se refiere a cómo garantizar que cada uno de los puntos en la región de interés (ROI) esté cubierto por los sensores. Para maximizar la cobertura, los sensores deben colocarse no muy cerca el uno del otro para que la capacidad de detección de la red se utilice por completo y al mismo tiempo no muy lejos el uno del otro para evitar la formación de agujeros de cobertura (área fuera de detección gama de sensores). La función principal de un sensor es detectar el entorno ante cualquier evento de interés. Por lo tanto, la cobertura es una de las principales preocupaciones en WSN. De hecho, se utiliza como una clave para la evaluación de la calidad de servicio (QoS) en WSN [6]. En este documento, el problema de cobertura se formula como un problema de optimización y PSO se utiliza para encontrar una solución óptima o casi óptima. . PSO es un algoritmo de optimización metaheurística que imita la inteligencia de enjambre de algunos organismos como las aves o los peces. Se ha utilizado con éxito en muchas aplicaciones [7]. En este documento, PSO se utiliza para encontrar la ubicación óptima de los sensores de acuerdo con una función de condición física que se basa en el diagrama de Voronoi. La ventaja de usar el diagrama de Voronoi sobre otras estructuras geométricas, por ejemplo, la cuadrícula, es que su complejidad computacional está controlada solo por un parámetro que es el número de sensores en la red. El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 revisa los trabajos relacionados con el problema de cobertura. La Sección 3 es un anteproyecto técnico donde se introducen el PSO, el diagrama de Voronoi y el problema de cobertura. El algoritmo propuesto se presenta en la sección 4 y luego el resultado de la simulación y la discusión en la sección 5. Finalmente, en la sección 6 se concluye el documento y se discute el camino futuro de nuestro trabajo.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Se han propuesto diferentes estrategias en la literatura para la optimización de la cobertura WSN. Chakrabartyet al. [8] propuso una estrategia de cobertura de la red para la vigilancia efectiva y el posicionamiento del objetivo utilizando la programación lineal de enteros (ILP). El campo del sensor se representa como una cuadrícula. Con los sensores colocados en los puntos de la cuadrícula, un objetivo puede ubicarse fácilmente en cualquier momento. Biagioni y Sasaki compararon tres tipos de cuadrículas: cuadrado, triángulo y hexágono [9]. Entre estas cuadrículas, la cuadrícula triangular es la mejor debido a la mayor tasa de supervivencia y la solidez a la falla de un solo nodo. Sin embargo, las estrategias de implementación basadas en la cuadrícula requieren que los sensores se coloquen de manera exacta y precisa en los puntos de la cuadrícula. Por lo tanto, este método está sujeto a errores como la desalineación y la colocación aleatoria [10]. Además de usarse como una disposición para el despliegue inalámbrico, la estructura de red también se usa en WSN para medir el porcentaje de cobertura, que es la relación del área real cubierta con el área de ROI. Calcular el área cubierta no es una tarea fácil debido a la superposición de la cobertura del sensor. Por lo tanto, los investigadores recurren a métodos de muestreo en los que solo se utiliza un conjunto de puntos dentro del ROI para evaluar la cobertura. Como lo muestran Zou y Chakrabarty, y Shen et al. [11,12] cuadrícula es uno de los métodos de muestreo más utilizados. En este caso, la cobertura se estima como la relación entre el número de puntos de cuadrícula cubiertos y el número total de puntos de cuadrícula en el ROI. El costo de cálculo de este método es O (nmk) donde n × m es el número de puntos de la cuadrícula yk es el número de sensores desplegados [12]. La precisión de la estimación depende del tamaño de cada cuadrícula, cuanto más pequeña sea la cuadrícula, más cercana será la estimación a la cobertura real. Otros enfoques para optimizar la cobertura en WSN son el campo virtual y el diagrama de Voronoi. Howard y Poduri [3] propusieron el concepto de campo virtual a WSN. Se supone que los nodos sensores y los obstáculos tienen campos potenciales que ejercen fuerzas virtuales. Los nodos se repelen entre sí hasta que sus campos de detección ya no se superponen o no pueden detectarse entre sí. Aunque este método garantiza una cobertura total y una conectividad total, depende en gran medida de la movilidad del sensor, que es una tarea de alto consumo de energía [2]. En [13], los sensores se implementan inicialmente de forma aleatoria. Según la ubicación inicial, transmiten sus ubicaciones y construyen su propio diagrama de Voronoi. Usando el diagrama formado, los sensores deciden si reposicionar, eliminar (reducir) los agujeros de cobertura o quedarse. Se sugieren tres protocolos: VEC (algoritmo basado en VECtor) - para expulsar los sensores del área densamente cubierta, VOR (algoritmo basado en VORonoi) - un sensor se mueve al vértice de Voronoi más alejado cuando detecta un agujero de cobertura y Minimax - para cubrir los agujeros moviéndose más cerca del vértice Voronoi más lejano pero no tan lejos como VOR. Otro trabajo que usa el diagrama de Voronoi es propuesto por Wang et al. [14] donde se utiliza la combinación de sensores estáticos y móviles. Los sensores estáticos construyen el diagrama de Voronoi que se usa para detectar agujeros de cobertura, mientras que los sensores móviles se usan para cerrar estos agujeros.

3. ANTECEDENTES

3.1 Optimización del enjambre de partículas

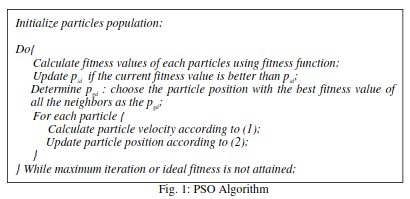
La optimización de enjambre de partículas (PSO) es una herramienta de optimización basada en la población inspirada en el comportamiento social natural de ciertos organismos como la cría de aves y la escolarización de peces desarrollada por Kennedy y Eberhart [15]. Este comportamiento se imita en PSO donde las partículas (agentes) vuelan sobre el dominio de búsqueda influenciado por su experiencia y la experiencia de los vecinos circundantes. El flujo algorítmico en PSO comienza con una población de partículas cuyas posiciones, que representan las posibles soluciones para el problema estudiado, y las velocidades, que determinan el próximo movimiento, se inicializan aleatoriamente en el espacio de búsqueda. La búsqueda de la posición óptima (solución) se realiza actualizando las velocidades de partículas (vid) y las posiciones (xid) mediante:



donde w es el peso de inercia utilizado para controlar el efecto de la velocidad anterior en la velocidad actual. Un tiempo que disminuye el peso de la inercia fomenta una alta exploración al comienzo y un ajuste fino al final de la búsqueda [16]. c1 y c2 son los factores de aprendizaje para controlar el efecto de los "mejores" factores de partículas; pid y pgd. rand () y Rand () son dos números aleatorios independientes en el rango de [0.0,1.0]. La velocidad de la partícula está influenciada directamente por dos factores; la mejor posición encontrada hasta ahora por la partícula (pid) y la mejor posición encontrada por las partículas vecinas (pgd). La calidad de la solución se evalúa mediante una función de aptitud, que es una función dependiente del problema. Si la solución actual es mejor que la idoneidad de pid o pgd, el mejor valor será reemplazado por la solución actual en consecuencia. Este proceso de actualización continuará hasta que se cumpla el criterio de detención, generalmente cuando se alcanza la iteración máxima o se alcanza la solución objetivo. El algoritmo PSO se muestra en la Fig.1. Los algoritmos basados ​​en PSO se proponen en [17] y [18] para la optimización de cobertura WSN, donde la estructura de cuadrícula cuadrada se utiliza en las funciones de aptitud para evaluar las partículas. Además de maximizar la cobertura, la minimización del consumo de energía en la red basada en clúster también se considera en [17]. La fase de minimización del consumo de energía sigue una fase de maximización de cobertura. En [18], la fuerza virtual se combina con el PSO coevolutivo (CPSO), de modo que se logra la mejor ubicación de los sensores. CPSO se usa aquí para aumentar la calidad de búsqueda y acelerar la tasa de convergencia, mientras que la fuerza virtual se introduce en la ecuación de velocidad de PSO para dirigir la búsqueda de partículas.  
  
Inicializar población de partículas;

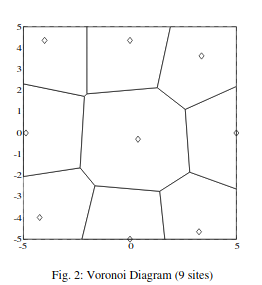
Hacer{  
 Calcular los valores de aptitud de cada partícula usando la función de aptitud;

Actualice pid si el valor de aptitud actual es mejor que pid;  
 Determinar pgd: elija la posición de partícula con el mejor valor de condición física de todos los vecinos como el pgd;  
  
 Para cada partícula {  
 Calcular la velocidad de las partículas de acuerdo con (1);  
 Actualice la posición de las partículas de acuerdo con (2);  
 }  
} Si bien no se alcanza la iteración máxima o la aptitud ideal;



3.2 Diagrama de Voronoi

El diagrama de Voronoi es una partición de sitios (mostrados como ◊ en la Fig. 2) de tal manera que los puntos dentro de un polígono están más cerca del sitio dentro del polígono que cualquier otro sitio, por lo tanto, uno de los vértices del polígono punto más alejado del polígono al sitio dentro de él. El diagrama de Voronoi se puede utilizar como método de muestreo para determinar la cobertura WSN; con los sensores actúan como los sitios. Si todos los vértices de los polígonos de Voronoi están cubiertos, entonces el ROI está completamente cubierto; de lo contrario, existen agujeros de cobertura [10]. El límite inferior para la complejidad computacional de la construcción del diagrama de Voronoi es Ω (N logN) [19], donde N es el número de sitios.



El diagrama de Voronoi se ha utilizado en una variedad de aplicaciones, como la extracción de palabras del documento de imagen [20], la planificación de la ruta de navegación del robot [21], la planificación de la ruta óptima de origen a destino [22], el estudio de la estructura de la proteína [23] y también WSN [ 13, 14].

3.3 El problema de cobertura

Dado un conjunto de N número de sensores, S = {s1, s2, ..., sN} y un ROI, el problema de cobertura es cómo colocar los sensores en el ROI para que el porcentaje de cobertura se maximice y los agujeros de cobertura se minimicen. Se puede clasificar en tres clases [6]; cobertura de área, cobertura de puntos y cobertura de barrera. La clasificación se basa en cuál es la principal preocupación del problema, ya sea para cubrir un área, vigilancia de límites o monitoreo de un conjunto de puntos de interés.

La cobertura de área, como su nombre indica, trata sobre cómo cubrir un área con los sensores, mientras que la cobertura de puntos se ocupa de la cobertura de un conjunto de puntos de interés. Disminuir la probabilidad de penetración no detectada es el problema principal en la cobertura de barrera. Este trabajo se ocupa de la cobertura de área, donde el objetivo es maximizar el porcentaje de cobertura. Este problema también puede verse como un problema de minimización [12]. Desde el punto de vista de la minimización, el objetivo ahora es cómo asegurarse de que el área total de los agujeros de cobertura en la red sea lo más pequeña posible.

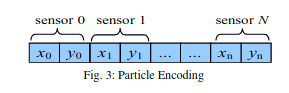
Básicamente, el problema de cobertura en WSN proviene de tres factores principales: no hay suficientes sensores para cubrir todo el ROI, rango de detección limitado y despliegue aleatorio. Dado que los sensores funcionan con una fuente de alimentación limitada, algunos de ellos pueden extinguirse, lo que da como resultado un número inadecuado de sensores para cubrir completamente el ROI completo, lo que provoca la existencia de agujeros. Otra razón es el rango de detección restringido del sensor, por supuesto, este problema puede resolverse mediante el uso de sensores con un rango de detección mayor, pero este tipo de sensores son más caros [8]. Uno de los aspectos atractivos de WSN es la capacidad de desplegarse al azar sin la necesidad de interferencia manual. Por ejemplo, en un entorno hostil e inalcanzable como el campo de batalla y un terreno empinado, los sensores se pueden soltar desde el aire.

Sin embargo, el despliegue aleatorio podría causar que algunos de los sensores caigan demasiado cerca el uno del otro, mientras que otros están demasiado separados. En ambas situaciones surge un problema de cobertura; en el primer caso, las capacidades de detección de los sensores se desperdician y la cobertura no se maximiza, mientras que en el último caso, se forman puntos ciegos. Como se indicó anteriormente, la cobertura se puede mejorar mediante el uso de sensores con un rango de detección mayor, pero esto es costoso. Por lo tanto, una de las soluciones más utilizadas es abordar el problema durante la fase de implementación. En lugar del despliegue aleatorio, el despliegue de WSN se puede hacer usando un plan predeterminado [5]. En el despliegue predeterminado, la cobertura de WSN se mejora planificando cuidadosamente las posiciones de los sensores en el ROI antes de su despliegue. Luego, los sensores se colocan de acuerdo con el plan de forma manual o con la ayuda de un robot móvil. Sin embargo, este método es costoso y adecuado solo para WSN pequeños. En cuanto al despliegue aleatorio, la cobertura inicial se puede mejorar manipulando la capacidad de locomoción de los sensores o utilizando un despliegue incremental después del inicial. En el enfoque de movilidad, los sensores móviles se reposicionan automáticamente después del despliegue temprano, para lograr una mejor disposición y maximizar la cobertura. Por otro lado, el método de implementación incremental implica analizar la cobertura inicial y agregar sensores en ubicaciones con orificio de cobertura. En general, para ambos métodos de implementación, el objetivo es resolver el problema de cobertura mediante la colocación de sensores.

4. ALGORITMO PROPUESTO  
  
En este documento, se propone un algoritmo PSO para encontrar un despliegue óptimo (o casi óptimo) del WSN para cubrir el área de ROI. Se supone que el ROI es un área cuadrada bidimensional y el WSN es homogéneo; Todos los sensores tienen un radio de detección similar. Además, se supone que los sensores conocen sus posiciones y poseen capacidad de locomoción; es decir, pueden moverse y cambiar de posición. El algoritmo se ejecutará en una estación base después de una colocación aleatoria inicial. Las posiciones óptimas finales de los sensores serán transmitidas por la estación base a los sensores, según esta información, los sensores se moverán a sus posiciones óptimas. Deben tenerse en cuenta dos cuestiones principales al implementar PSO para un problema: la codificación de partículas y la función de aptitud.

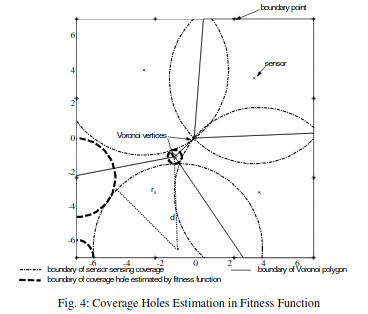
4.1 Codificación de partículas

Una partícula codifica una solución para el problema de cobertura. La solución final representa las posiciones óptimas de los sensores. La posición de un sensor j se describe mediante dos coordenadas (xj, yj). Considerando N número de nodos sensores, la partícula



4.2 La función Fitness

La función de aptitud evalúa la solución codificada en una partícula. Aquí el problema de cobertura se considera como un problema de minimización donde el objetivo es minimizar el área total de agujeros de cobertura. La cobertura se mide según el diagrama de Voronoi de la siguiente manera. Según las posiciones de los sensores codificadas en una partícula, se calcula el diagrama de Voronoi. Para medir los agujeros de cobertura, se requiere seleccionar un conjunto de puntos, llamados puntos de interés. El conjunto de puntos de interés consiste en los vértices de los polígonos de Voronoi, obtenidos a partir del diagrama de Voronoi calculado, y una cantidad de puntos distribuidos uniformemente en el límite de los polígonos. Estos puntos en el límite actúan como fuerzas de tracción que evitan que los sensores se congreguen alrededor de un punto particular en el ROI. El número de puntos en el límite debe elegirse cuidadosamente porque demasiados puntos atraerán demasiado los sensores al límite y reducirán la cobertura y muy pocos puntos no impedirán que los sensores se congreguen. El área total de agujeros de cobertura se determina de la siguiente manera: se calcula la distancia de los puntos de interés a sus sensores más cercanos. Si la distancia (d) es mayor que el radio de detección (rs), entonces existe un agujero de cobertura alrededor del punto de interés. Si el punto de interés es un vértice de Voronoi, el área del agujero se aproxima como el área circular alrededor del vértice no cubierta por el sensor más cercano, mientras que si es un punto de esquina en el límite, entonces es un cuarto del círculo. Sin embargo, si está en el límite, entonces es la mitad del círculo. La estimación del área del agujero se muestra en la figura 4. El radio del círculo del agujero es la diferencia entre d y rs (d-rs). Por lo tanto, la aptitud es la suma del área de los agujeros de cobertura en el ROI. Idealmente, el valor de aptitud debería ser igual a cero, lo que indica que no existen agujeros de cobertura. Suponiendo que hay K puntos de interés: puntos de límite y vértices de Voronoi, la función de aptitud se puede calcular como en la Fig.5.



límite de la cobertura de detección del sensor ///////////límite del orificio de cobertura estimado por la función de aptitud

Fig. 4: Estimación de los agujeros de cobertura en la función Fitness

La complejidad computacional de esta función de aptitud se basa en el número de vértices de Voronoi que, a su vez, es proporcional al número de sensores. Esta es una ventaja sobre la estructura de la cuadrícula donde la complejidad y la precisión del cálculo dependen no solo del número de sensores sino también del tamaño de la cuadrícula. Además, es necesario determinar el tamaño de la cuadrícula para equilibrar la precisión y el tiempo de cálculo.

Aptitud = 0;  
Calcule el diagrama de Voronoi en función de la posición de los sensores;  
Puntos de interés = {vértices poligonales dentro del ROI, n puntos distribuidos uniformemente a lo largo del límite};  
Para cada punto de interés  
 Encuentre la distancia del punto de interés actual a su sensor más cercano;  
 Si distancia> radio de detección  
 Agujero = × (distancia - radio de detección) ^ 2;  
 Si el punto de interés actual está en el límite de ROI  
 Si el punto de interés actual está en la esquina de ROI  
 Fitness + = Hoyo / 4;

Else

Fitness + = Hoyo / 2;  
 Else  
 Fitness + = Agujero;  
 Final

