

Ubicación de sensores inalámbricos en cualquier lugar: suministro de redes inalámbricas de sensores fiables y de bajo consumo a largas distancias

Artículo cedido por Linear Technology



www.linear.com

Autores:

Lance Doherty, Ingeniero de Sistemas

Jonathan Simon, Director de Ingeniería de Sistemas

Thomas Watteyne, Ingeniero de Sistemas

Ross Yu, Responsable de Marketing de Producto

Grupo de Productos Dust Networks, Linear Technology

Una de las visiones del Internet de las Cosas consiste en la capacidad de medir y utilizar cosas que nunca se han medido antes. Al supervisar una infraestructura antigua, como puentes, túneles o líneas de transmisión eléctrica, o al proporcionar información sobre aparcamiento o tráfico en tiempo real, estas aplicaciones necesitan redes inalámbricas de sensores (wireless sensor networks, WSN) para ofrecer unas prestaciones similares a las de una red cableada junto con su práctica instalación. Es necesario que estas WSN puedan aceptar un gran número de nodos inalámbricos, y en muchos casos que cubran largas distancias.

Claves para un uso generalizado

Para que las WSN se instalen a gran escala, su instalación debe ser práctica y deben funcionar de forma fiable durante muchos años, a menudo durante más de una década. Para que esto sea posible, las WSN deben cumplir una serie de requisitos fundamentales:

- **Ubicación de un sensor en cualquier lugar** – Es necesario colocar puntos de medida allí donde sea óptimo para el sensado, pero no necesariamente óptimo para la comunicación. Como resultado de ello, los nodos de sensores se colocan a menudo en lugares que no tienen necesariamente un acceso cómodo a comunicaciones o infraestructura de alimentación, y a menudo se encuentran en entornos difíciles desde el punto de vista de RF (p.ej., cerca de tierra, en túneles, debajo de coches o en un punto muy profundo dentro de la maquinaria).

- **Bajo mantenimiento** – La red debe tener un alto grado de automantenimiento y cualquier mantenimiento físico (como por ejem-

plo la sustitución de la batería) no debe implicar el desplazamiento de un vehículo o la visita de un técnico. Por ejemplo, en aplicaciones de aparcamiento inteligente, solo se permite instalar sensores alimentados por baterías sobre la superficie de la calle si se pueden sustituir con el mismo intervalo que las reparaciones periódicas de la calzada, que se realiza con una frecuencia de unos 5-7 años. En otras aplicaciones, las WSN se instalan para que funcionen durante más de una década.

- **Fiabilidad de comunicaciones** – Deben ser capaces de comunicarse de manera fiable con los sensores pese a que pueden instalarse en un entorno adverso desde el punto de vista de RF.

- **Escalabilidad** – Una red debe ser apropiada para diversas instalaciones similares pero únicas que cubran una amplia variedad de tamaños de la red (tanto en número de nodos como en cobertura), profundidad (es decir, el número de saltos de la señal de radio hasta un nodo desde un punto de salida de datos), nivel de tráfico de datos, etc.

Construcción de una red previsible sobre un medio imprevisible

Es difícil lograr un bajo consumo sin lograr un punto de equilibrio entre varios aspectos

Existen numerosas técnicas dentro de las redes inalámbricas de sensores que buscan un funcionamiento de bajo consumo. Algunas redes inalámbricas, como ZigBee, solo consiguen un bajo consumo en los dispositivos de Sensado instalados al borde de la red, pero necesitan líneas de alimentación para los nodos de enrutamiento. Otras redes añaden una forma básica de ciclo de trabajo, denominado

“balizamiento”, en el cual toda la red se apaga y pasa a un modo dormido de bajo consumo durante largos períodos de tiempo, pero se sacrifican la disponibilidad de la red y la capacidad total de la red.

Sin embargo, para los tipos de aplicaciones relacionados con el Internet de las Cosas, las redes inalámbricas de sensores deben ser capaces de albergar redes mucho más grandes y de comunicarse a intervalos regulares de datos. El reto consiste por tanto en proporcionar un bajo consumo sin sacrificar la fiabilidad o la disponibilidad de la red.

La RF es imprevisible

La radio (RF) es un medio de comunicaciones imprevisible. A diferencia de las comunicaciones por cable, en las cuales la señal de comunicaciones se protege del mundo exterior mediante el cableado, la RF se propaga al aire libre e interactúa con el entorno circundante. Existe la posibilidad de que otras fuentes de transmisión de RF provoquen interferencias activas. Es mucho más habitual el efecto del desvanecimiento por múltiples rutas, donde el mensaje de RF puede verse atenuado por su propia señal reflejada por las superficies circundantes y llega fuera de fase.

Los usuarios de teléfonos móviles experimentan el desvanecimiento por múltiples rutas a diario cuando su terminal tiene una débil intensidad de señal en un punto determinado, pero pueden mejorarla moviéndolo unos pocos centímetros.

Además, los efectos de las diversas rutas cambian a lo largo del tiempo, ya que las superficies reflectoras (como personas, coches o puertas) suelen moverse. El resultado es que todo canal de RF experimentará una variación significativa de la calidad de señal

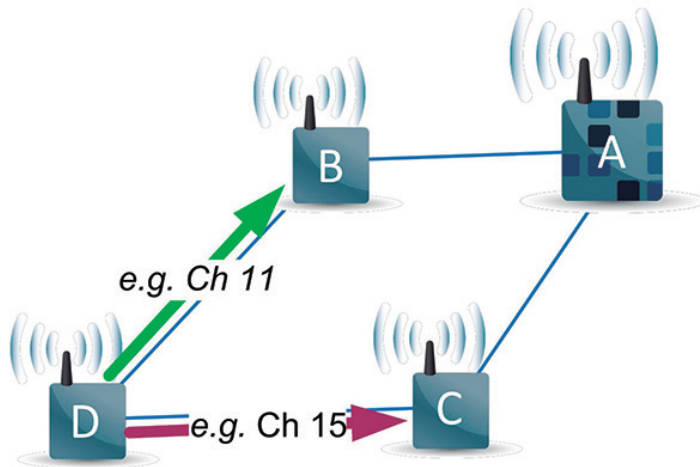


Figura 1. Diversidad de rutas y frecuencias – Si falla la comunicación a través de la flecha de color verde, el nodo D lo reintentará a través de la flecha de color morado utilizando otro canal.

a lo largo del tiempo. No obstante, dado que el desvanecimiento por múltiples rutas afecta a cada de señal de RF de forma distinta, la utilización del salto de canal para las diversas frecuencias minimiza sus efectos negativos. El reto para las WSN es por tanto la capacidad de utilizar el salto de frecuencia en redes grandes con múltiples saltos.

Redes de malla con saltos de canal sincronizados en el tiempo

Las redes inalámbricas de sensores fiables y de bajo consumo son una realidad gracias a las redes de malla con saltos de canal sincronizados en el tiempo (Time Synchronized Channel Hopping, TSCH) desarrolladas como primera por Dust Networks de Linear Technology y que han demostrado su validez algunos de los entornos más adversos.

TSCH ya constituye un bloque funcional básico en estándares inalámbricos industriales como WirelessHART (IEC62591) y es una pieza fundamental para el desarrollo de estándares emergentes para redes inalámbricas de sensores basadas en IP.

En una red TSCH, cada nodo tiene un sentido del tiempo común que tiene en toda la red una precisión de menos de unas pocas decenas de microsegundos. La comunicación de la red se organiza en franjas temporales que permi-

ten un intercambio de paquetes de bajo consumo, saltos de canal emparejados y una total diversidad de rutas.

Intercambio de paquetes de bajo consumo

La utilización de TSCH permite que los nodos pasen a modo dormido con un consumo ultrabajo entre las comunicaciones programadas. Un dispositivo solo está en activo si está enviando un paquete o esperando un paquete potencial de un dispositivo vecino. Y lo que es aún más importante, cada nodo sabe cuándo está programada su reactivación y siempre está disponible para recibir información de sus vecinos. Por tanto, las redes TSCH a menudo alcanzan ciclos de trabajo <1% conservando al mismo tiempo la total disponibilidad de la red. Además, dado que la transacción de cada paquete está programada, no se producen colisiones de paquetes dentro de una red TSCH. Las redes pueden ser densas y se pueden dimensionar sin generar autointerferencias de RF que la debiliten.

Saltos de canal emparejados

La sincronización temporal permite efectuar saltos de canal en cada par transmisor-receptor para una mayor diversidad de frecuencias. En una red TSCH, cada canal de intercambio de paquetes salta con el fin de evitar las inevitables interferencias y desvanecimientos

de señal de RF. También se pueden producir múltiples transmisiones entre diferentes pares de dispositivos simultáneamente y en diferentes canales, aumentando así el ancho de banda de la red.

Total diversidad de rutas y frecuencias

Cada dispositivo tiene rutas redundantes para superar las interrupciones de las comunicaciones ocasionadas por interferencias, obstáculos de tipo físico o desvanecimiento por múltiples rutas. Si la transmisión de un paquete falla en una ruta, un nodo volverá a reintentarlo automáticamente a través de la siguiente ruta disponible y un canal de RF diferente. A diferencia de otras tecnologías de malla, una red TSCH no necesita enrutadores con su alimentación correspondiente y un descubrimiento de rutas que consume mucho tiempo.

Las redes basadas en TSCH se están instalando con éxito actualmente en aplicaciones como el aparcamiento inteligente, centros de datos para supervisar la eficiencia energética y en plantas industriales. Muchas aplicaciones, como la supervisión de tuberías, la supervisión estructural de puentes y túneles, así como la supervisión de líneas eléctricas, exigen que la WSN cubra largas distancias. Sin embargo, la capacidad de establecer y mantener con éxito una red inalámbrica fiable y de bajo consumo a lo largo de estas distancias representa una de las topologías de red más exigentes. Por definición, una red con profundidad de saltos (deep-hop) significa que los

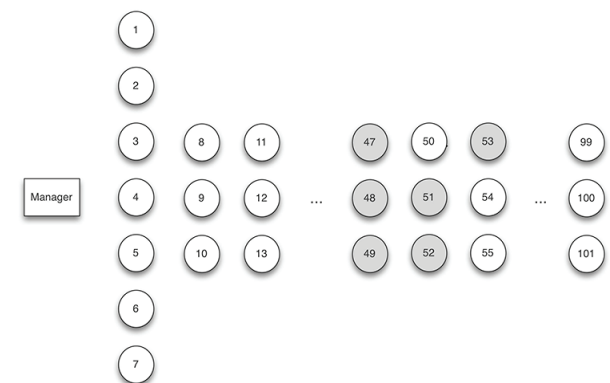


Figura 2. Red con profundidad de saltos: los nodos grises están al alcance del nodo 50.

Número de nodos	100
Velocidad de generación de paquetes	~1 paquete de datos / 30 segundos desde cada nodo
Profundidad de saltos	32 saltos
Número de paquetes de datos enviados	17 millones durante 52 días
Número de transmisiones individuales (incluyendo reintentos)	Más de 400 millones
Paquetes perdidos	0 (100% de fiabilidad de los datos)

Tabla 1. Fiabilidad de los datos de una red con profundidad de saltos.

mensajes procedentes de los nodos más lejanos deben dar muchos saltos para alcanzar su destino. Si bien de esta forma una sola red puede cubrir una gran superficie geográfica con transceptores de consumo relativamente bajo, en ocasiones surge la preocupación de que una red larga pueda asumir con éxito un tráfico regular de da-

tos procedente de todos sus nodos, y lograrlo con una latencia y un consumo de corriente aceptables.

Estudio de caso: una red de malla con profundidad de saltos

Para obtener una red de este tipo se construyó una red con 100 nodos y 32 saltos de profundidad utilizando la red IP SmartMesh de Dust Networks. Cada uno de los 100 nodos generó y envió un paquete de datos cada 30 segundos con la previsión de cada paquete fuera recibido con una latencia máxima de 30 segundos (es decir, antes de que el mismo nodo genere el siguiente paquete).

La red profunda se construye a partir de dispositivos inalámbricos reales y en ella siete dispositivos (que reciben las identificaciones 1 a 7) se comunican directamente con el administrador. Los dispositivos 8 a 10 se comunican a través de los siete primeros nodos y los dispositivos restantes (dispositivos 11 a 101) están al alcance de los tres dispositivos inferiores y superiores. Por ejemplo, el dispositivo 50 está al alcance de los dispositivos 47, 48, 49, 51, 52 y 53. En esta topología, el número mínimo de transmisiones (saltos) necesarios para llegar hasta el dispositivo 101 es de 32, aunque en la práctica la mayoría de paquetes necesitan más saltos.

En el momento de escribir este artículo, esa red llevaba ya 52 días en funcionamiento continuo. En total se han recogido 17 millones de paquetes de datos que requieren más de 400 millones de transmisiones debido a la profundidad y los reintentos de salto. De los 17 millones de paquetes enviados, no se perdió ninguno, por lo que la fiabilidad de los datos es del 100%. Unos 25.000 de estos paquetes son "informes de estado", es decir, información de diagnóstico enviada periódicamente por los nodos.

Análisis de latencia y consumo de corriente

Cada paquete tiene un registro temporal cuando se genera en el nodo del sensor y de nuevo cuando es recibido por el administrador,

por lo que se puede supervisar la latencia de cada paquete. La Figura 3 muestra la distribución de los datos en esta red a lo largo de un período de 90 minutos.


Tal como era previsible, los nodos con las identificaciones más altas, que se encuentran a mayor profundidad en la red, tienen una mayor latencia y una mayor variación por paquete, ya que las opciones de ruta aumentan exponencialmente con la profundidad. Pese a ello, todos los paquetes de datos procedentes del nodo más lejano (identificación 101) llegaron a su destino en menos de la latencia de 30 segundos marcada como objetivo.

Todos los nodos conservan internamente el número de cargas de batería consumidas y envían esta información periódicamente al administrador. A partir de esta información se puede obtener un gráfico de la corriente media en la red como muestra la Figura 4. Los nodos con bajos números de identificación muestran el consumo más alto de corriente ya que transportan el tráfico procedente de los nodos más lejanos.

Tal como se puede ver, incluso los enrutadores con más carga en esta red con 32 saltos de profundidad presentan consumos medios de corriente de unos pocos centenares de microamperios. Con un consumo tan bajo de corriente, los nodos de enrutamiento se pueden alimentar con un par de baterías de litio de tipo D durante más de 15 años.

Conclusión

Las redes IP SmartMesh, basadas en saltos de canal sincronizados en el tiempo (Time Synchronized Channel Hopping, TSCH) ofrecen habitualmente una fiabilidad de datos superior al 99,999% y un consumo muy bajo en aplicaciones exigentes.

Con 10-15 años de funcionamiento con unas baterías de litio de tamaño razonablemente reducido, puede decirse que los sensores inalámbricos se pueden instalar en cualquier lugar y permiten aplicaciones de Internet de las Cosas a la escala de una ciudad real. 

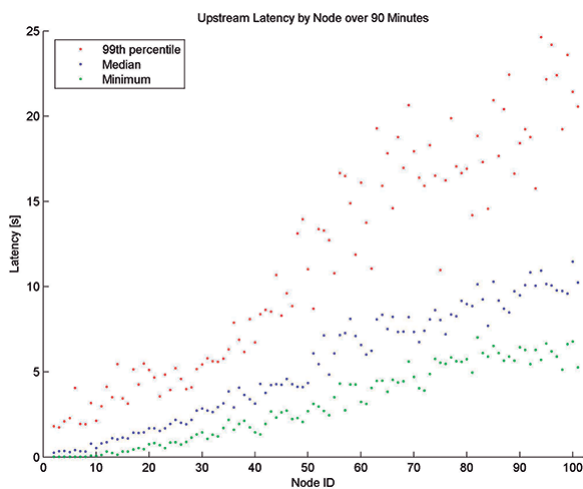


Figura 3. Latencia del paquete - en una red profunda los paquetes se entregan de manera fiable y dentro de la latencia de 30 segundos marcada como objetivo.

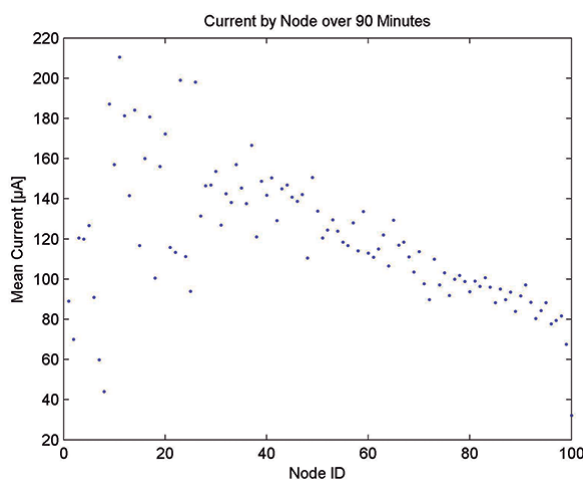


Figura 4. Corriente media por nodo - incluso los enrutadores con más carga en esta red profunda consumen tan solo unos pocos centenares de microamperios.