

# Meshprotokollet kan göra stor skillnad

Trimma trafik och effekt med smartare protokoll i meshnätet.



## Av Ross Yu, Linear Technology

Ross Yu och hans grupp på Dust Networks har gett viktiga bidrag till att lösa utmaningar inom det spännande området trådlösa sensornät, och han är mannen bakom en av marknadens effektivaste och mest pålitliga meshsensornätslösningar. Ross Yu läst elektroteknik och datavetenskap på Massachusetts Institute of Technology.

En av de största fördelarna med koppla upp dina industrianläggningar på Internet (Industrial Internet of Things) är att de data du samlar upp i den fysiska världen via trådlösa sensornätverk (WSN), både kan öka effektiviteten och strömlinjeforma dina affärsmetoder. De krav som ställs på trådlösa sensornät är många och varierande eftersom sensorer kan placeras nästan överallt: i byggnader, i industrianläggningar, i tunnlar, på fordon i rörelse, på stadsgator och broar, och på avsedda belägna platser som långa rörledningar eller i väderstationer.

Ett ofta återkommande krav inom Industrial IoT är att de trådlösa sensornäten både ska vara lika energisnåla och tillförlitliga som trådbundna alternativ och att detta ska gälla för ett brett spann av nätverkstopologier, -storlekar och datafrekvenser.

**TRÅDLÖSA MASKNÄTVERK** (meshnät) har blivit allt populärare. Detta eftersom de förmår att täcka in stora ytor med ganska energisnåla radiokretsar. Kretsarna överför meddelanden från en nod till nästa, och bibehåller hög tillförlitlighet och undviker störningar genom att kunna ta alternativa vägar genom nätet.

Framför allt en viss nätteknik kallad TSCH (Time Synchronized Channel Hopping) har i fältprov visat sig kunna leverera den prestanda som behövs för Industrial IoT. Den är utvecklad av Linear Technologys Dust Networks och ingår i industristandarden WirelessHART.

TSCH-nät är normalt mer än 99,999 procent datatillförlitliga. Samtliga trådlösa noder, även de för routing, har en batterilivslängd på många år med små litiumbatterier.

En rad meshnät utnyttjar teknik som beskrivs på liknande vis, till exempel "frequency agility" istället för "channel hopping" och "sleepy" istället för "time

synchronized". De ger dramatiskt olika prestanda vilket visar att valet av protokollnivå kraftigt påverkar prestandan hos trådlösa sensornät och hur lämpligt nätverket är för en viss tillämpning.

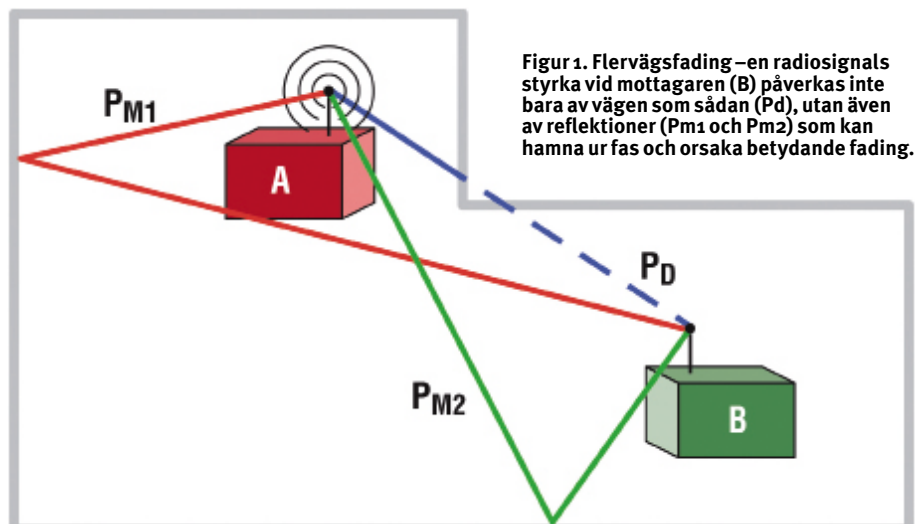
**EFTERSOM TRÅDLÖS UTRUSTNING** till sin natur är otillförlitlig, är det viktigt att förstå vad som ligger till grund för denna otillförlitlighet så att hänsyn kan tas till detta i ett kommunikationssystem. Till skillnad från trådbundna kommunikationer, där kabblarna skärmar kommunikationssignalen från omvärlden, fortplantas RF i luften och interagerar med omgivningen.

Aktiv interferens orsakad av andra RF-sändningskällor är en möjlighet. Betydligt vanligare är dock effekten av flervägsfading, vilket innebär att RF-meddelandet dämpas av att den egna signalen studsar mot intilliggande ytor och hamnar ur fas (figur 1). Mobiltelefonanvändare upplever effekterna av flervägsfading varje dag när deras telefoner tycks ha dålig mottagning

på ett ställe, men bättre igen bara några centimeter därifrån. Effekterna av flervägsfading ändras över tiden, eftersom intilliggande ytor som människor, bilar och dörrar, normalt flyttar på sig. Slutresultatet är att signalkvaliteten varierar kraftigt över tiden för samtliga RF-kanaler.

**YTTERLIGARE ETT PROBLEM** är det faktum att flervägsfading är oförutsägbar. Ett nätverk måste per definition aktivt sända på en kanal för att kunna avgöra och därmed mäta kanalens prestanda när den ställs inför flervägsfading. Därmed kan mätning av en enkel passiv signalstyrka (RSSI) hos en outnyttjad kanal visserligen vara till hjälp för att detektera aktiv interferens, men metoden kan inte förutsäga kanalens lämplighet i fråga om flervägsfading.

Lyckligtvis kan flervägsfadingens negativa effekter minimeras genom kanalhopande frekvensspridning, eftersom den påverkar RF-kanalerna olika och förändras över tiden.



Figur 1. Flervägsfading – en radiosignals styrka vid mottagaren (B) påverkas inte bara av vägen som sådan ( $P_d$ ), utan även av reflektioner ( $P_{M1}$  och  $P_{M2}$ ) som kan hamna ur fas och orsaka betydande fading.

För att hjälpa oss att förstå hur olika trådlösa sensornät fungerar när de ställs inför dessa problem kan vi studera de tekniker som ofta används i trådlösa masknät för att sprida frekvensen och spara energi.

**Enkanaliga trådlösa sensornät och kanalrörlighet**

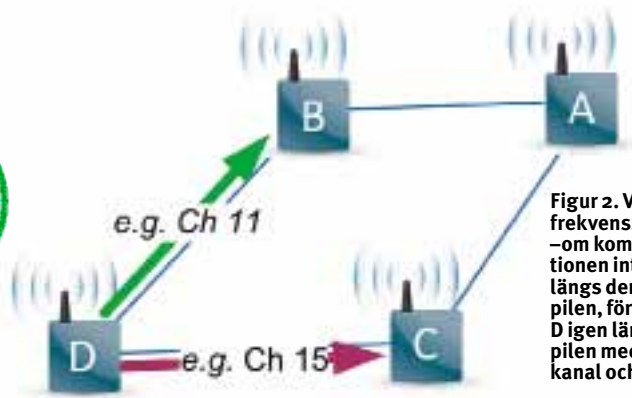
I enkla implementeringar av trådlösa masknätverk är det vanligt att samtliga noder fungerar på en enda kanal. Eftersom bara en RF-kanal utnyttjas, kan per definition endast en utrustning i taget sända. Utvecklare av nätverksstackar väljer fortfarande ofta enkanalig funktion på grund av den relativt enkla implementeringen, vilket resulterar i ett WSN med praktiskt taget ingen frekvensspridning.

**Inställning av pulslängd med "sömniga" nätverk**

För energisnål drift utför trådlösa sensornätverk någon form av inställning av pulslängden för att minimera den andel tid som spenderas i aktivt läge (till exempel sändning och mottagning, som normalt drar ström räknad i milliampere) och istället maximera tiden i energisnålt sovläge (normalt 1 mA eller mindre).

Vissa trådlösa sensornätverk är utrustade med sovlägen för hela nätverket (sömniga/sleepy masknät), i vilket samtliga noder i nätverket försätts i ett energisnålt sovläge under långa perioder och sedan vaknar ungefär samtidigt för att sända/motta/vidarebefordra nätverkstrafik. Med sådana sovrangemang är nätverket fullständigt otillgängligt för kommunikation under den inaktiva perioden. Om ett WSN exempelvis endast vaknar en gång i timmen för kommunikation, är det omöjligt för nätverket att skicka ett larmmeddelande under den timmen, inte heller kan den ta emot ett kommando från en styrkrets att tända en varningslampa.

Det är också viktigt att överväga hur användningen av sovande nätverk påver-



Figur 2. Väg- och frekvensspridning – om kommunikationen inte fungerar längs den gröna pilen, försöker nod D igen längs den lila pilen med en annan kanal och signalväg.

kar det trådlösa sensornätets förmåga att hantera driftsförhållanden i den verkliga världen. Under de långa soverperioderna är den omgivande RF-miljön fortfarande dynamisk och föränderlig. Signalvägar som blir oanvändbara när nätverket sover kan bara repareras när nätverket vaknar. Än mer problematiskt är det faktum att sovande nätverk brukar vara enkanaliga nätverk, vilket gör att nätverket utsätts för ytterligare stress under sin aktiva period och ökar risken att kommunikationen blir instabil.

En annan effekt av att utnyttja sovlägen för hela nätverket är att detta tillvägagångssätt tvingar användaren att acceptera en lägre datahastighet än den som tillämpningen kräver. Detta är en olycklig kompromiss, eftersom den huvudsakliga meningen med ett WSN är att överföra data tillförlitligt, och att använda den informationen för att möjliggöra djupare insikt i användarens system genom att påvisa driftstrender och ineffektivitet, såsom exempelvis avtagande prestanda i åldrande motorer eller ökade cykliska energiuttag hos äldre kylutrustning i affärer.

**Tidssynkroniserade kanalhoppande masknätverk**

Tidssynkroniserade kanalhoppande masknätverk (TSCH) utnyttjar snäv tidssynkronisering över ett nätverk som kan göra många hopp för att koordinera kommunikation och användning av frekvenskanaler. I ett TSCH-nätverk delar samtliga noder en gemensam tidsavkänning som är noggrann över nätverket till inom några få tiondels

mikrosekunder. Noderna utbyter information om timing-offset med intelligande noder för att bibehålla tidssynkroniseringen. Nätverkskommunikationen är organiserad i tidsluckor, inom vilka möjlighet till individuell paketsändning/-mottagning är schemalagd. Det innebär att varje tidslucka är lång nog (till exempel 7,5 ms) för att en sändningsnod ska kunna vakna, sända ett paket och motta bekräftelse från mottagnoden.

Nätverkstrafiken i ett TSCH kan schemaläggas dynamiskt, vilket möjliggör parvisa kanalhopp, full signalväg och frekvensspridning, energisnål paketöverföring och högt tillgänglig inställning av pulslängd.

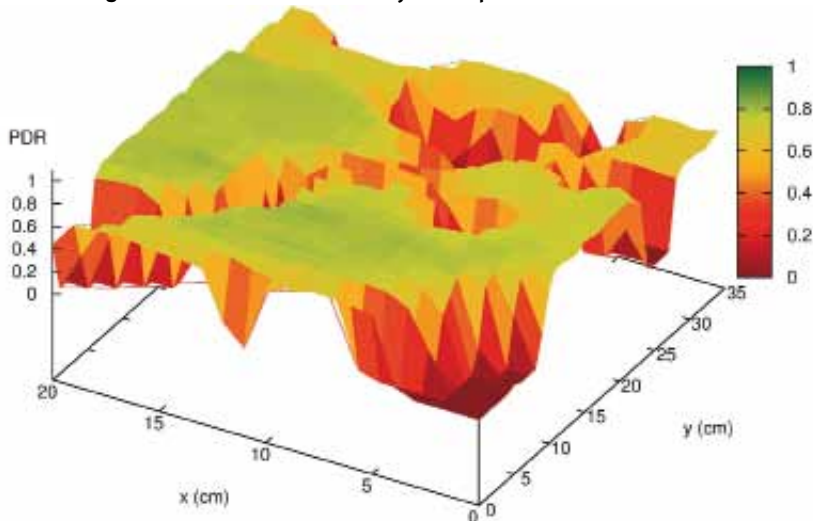
**Parvisa kanalhopp**

Tidssynkroniseringen möjliggör kanalhopp på varje par av sändare och mottagare för frekvensspridning. I ett TSCH-nät kanalhoppas varje paketutbyte för att undvika oundviklig RF-interferens och fading. Dessutom kan flera sändningar mellan olika par ske samtidigt på olika kanaler, vilket ökar nätverkets bandbredd. Det finns exempelvis femton användbara kanaler tillgängliga i radiospeifikationen IEEE 802.15.4 för 2,4 GHz, som är ett populärt alternativ för WSN-implementeringar på grund av att detta ISM-band är globalt tillgängligt. Detta gör att den tillgängliga bandbredden är femton gånger så stor hos ett TSCH-nätverk jämfört med ett enkanaligt 802.15.4 WSN.

**Full signalväg och frekvensspridning**

Varje krets har ett överskott av vägar för att

**Figur A1. Flervägsfading** att kvaliteten hos en länk kan variera drastiskt, mottagaren behöver kanske bara förflyttas ett par centimeter.



klara av kommunikationsavbrott orsakade av störningar, fysiska hinder eller flervägsfading. Om en paketsändning misslyckas på en väg, görs automatiskt ett försök på nästa tillgängliga väg och en annan RF-kanal (se figur 1). Genom att utöva vägspridning och frekvensspridning vid varje nytt försök (tidspridning), är sannolikheten för att ett nytt försök ska lyckas större än i ett enkanaligt system.

#### Fördelen med att kombinera TSCH med energisnål hårdvara

Driftsströmmen för 802.15.4-sändtagare i allmänt bruk, såsom exempelvis sändning, mottagning och sovläge har minskat stadigt under de senaste tio åren. LTC5800-IPM från Linear Technology drar exempelvis 9,5 mA för en sändningskraft på +8 dBm och 4,5 mA för mottagning, vilket är tre till fem gånger mindre än tidigare generation av 802.15.4-sändtagare. Att minska toppströmmen är en bra början, men den energi som krävs för att skicka ett paket är en funktion av den mängd laddning som tas ut under en viss tidsperiod.

Med strömuttaget mätt via oscilloskop och inritat i ett tidsdiagram (se figur 2) ges den energi som krävs för att skicka ett paket av området under kurvan. Energin påverkas inte bara av toppströmmen, utan även av hur länge varje operation är aktiv.

Produkter som exempelvis LTC5800-IPM ger noggrant optimerade packetutbyten med framgångsrik paketsändning/-bekräftelse med endast 54,5 µC laddning vid 3,6 V matningsspänning (eller 196,2 µJ energi).

#### Energisnål systeminställning

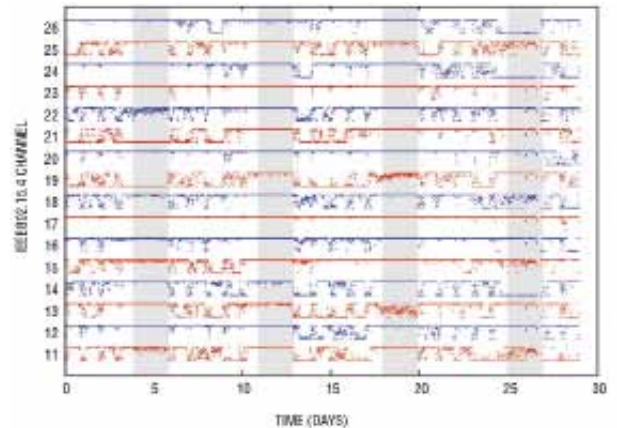
Genom att anta en mer holistisk syn på hur energi spenderas i ett trådlöst sensornätverk kan vi se att energisnål förbrukning kan ses som en funktion av datatrafiken, liksom den energi som krävs för att skicka ett paket och det antal nya försök som behövs för att framgångsrikt skicka ett paket från en nod till nästa:

$$\text{Average Energy} = \left( \frac{\text{Num Packets}}{\text{Period of Time}} \right) \times \left( \frac{\text{Energy}}{\text{per Packet}} \right) \times \left( \frac{\text{Num Retries to Successfully Send A Packet}}{\text{per Packet}} \right)$$

Genom att fokusera på energi per paket och använda ett nätverksprotokoll som använder tid-, väg- och frekvensspridning vid varje nytt försök – vilket därmed minskar det antal försök som i genomsnitt krävs för att skicka ett paket – kan låg strömförbrukning uppnås genom att hela systemets verkningsgrad förbättras snarare än genom att uppoffringar görs i tillämpningen.

Kommunikationsschemat i ett TSCH-nätverk är mycket konfigurerbart, och kommunikationens tidsluckor tilldelas automatiskt beroende på tillämpningens behov. Ett TSCH-nätverk kan konfigureras för långsam datahastighet för minimerad energiåtgång, och möjliggör potentiellt användning av Energy Harvesting-teknik. Samma TSCH-nätverk kan konfigureras att stöda en heterogen rapporthastighet, som är vanligt i industrianläggningar, med variabler som förändras långsamt (tanknivåer) och sådana som förändras snabbare (flödet i en rörledning). Ett TSCH-nätverk tilldelar automatiskt de tidsluckor som krävs till de delar av ett nätverk som behöver dem.

I stället för att tvinga användare att



**Figur A2. Förhållandet för paketleveransen hos en trådlös länk varierar över tiden.**

skraddarsy sina tillämpningar så att de passar nätverkets behov, kan ett TSCH-nätverk skraddarsys att tillgodose behoven hos en rad olika tillämpningar.

#### Effekter av flervägsfading på trådlös kommunikation

Flervägsfadingen beror på läget och egenskaperna hos samtliga saker i miljön, och det finns inget praktiskt sätt att förutsäga den. En bra egenskap är att den topografi som visas i figur A1 förändras med frekvensen. Det innebär att om ett paket inte motas på grund av flervägsfading är det större sannolikhet att ett nytt försök på en annan frekvens lyckas.

Eftersom saker i miljön inte är statiska förändras effekten av flervägsfadingen över tiden. Bilar kör exempelvis förbi och dörrar öppnas och stängs. Figur A2 visar leveransförhållandet för paket på en enda trådlös väg mellan två industriella sensorer under en 26 dagarsperiod, samt för vardera av de 16 kanaler som används i systemet. Figuren visar på veckovisa cykler, där arbetsdagar och helger tydligt kan urskiljas. Vid en given tidpunkt är vissa kanaler bra (hög leverans), andra dåliga och ytterligare andra mycket varierande. Kanal 17, som mestadels är bra, har åtminstone en period med noll leverans. Varje väg i detta nätverk visar kvalitativt liknande beteende, men unik kanalprestanda, och det finns aldrig en kanal som fungerar överallt i nätverket.

På grund av interferens och flervägsfading är receptet för att bygga ett tillförlitligt trådlöst system att utnyttja en mångfald av kanaler och vägar. ■