Genmäle till ”OAM knappast något för radiokommunikation”

Leif Åsbrink skrev i EiN nr 7 en insändare angående Gunnar Lilliesköld referat av professor Bo Thidés föredrag under seminariet GigaHertz 2008, som hölls på Chalmers Tekniska Högskola den 5 mars. Bo Thidé går här i svaromål.

I tekniska sammanhang brukar begreppet elektromagnetisk strålning lite oprecist beskrivas som det fysikaliska fenomen som medger att elektromagnetisk energi (eller snarare effekt) transporteras från en sändare till en mycket avlägsen mottagare. Effektflödet dem mellan beskrivs vanligtvis av den så kallade Poyntingvektorn vilken – sånär som på en konstant faktor – är identisk med (flödet av) den elektromagnetiska rörelsemängd (engelska: linear momentum) som överförs från sändaren till mottagaren.

En enkel uträkning (som brukar inkluderas även i elementära läroböcker) visar att det integrerade Poyntingflödet över en sluten yta mycket långt bort är konstant, d v s oberoende av avståndet från sändaren. Således avklingar inte den totala utsända rörelsemängden (effekten, energin) med avståndet utan transporteras bort ”för evigt”.

En grundläggande fysikalisk egenskap hos elektromagnetismen som gör detta möjligt – och samtidigt utgör grunden till dagens konventionella radiokommunikationsteknik – är att den elektromagnetiska rörelsemängden är en bevarad fysikalisk kvantitet. Att en fysikalisk kvantitet är bevarad, eller som vi fysiker säger uppfyller en konserveringslag, är något vi känner igen från vardagens fysik, t ex då vi får rekyl i mekaniska system och Dopplerskift i akustiska och elektromagnetiska vågprocesser. Energins oförstörbarhet är en annan välkänd konserveringslag.

Men som visas i moderna läroböcker i elektrodynamik består elektromagnetisk strålning inte enbart av rörelsemängd utan också av rörelsemängdsmoment (engelska: angular momentum). Liksom den förra uppfyller också den senare en konserveringslag och är därför även denna en bevarad fysikalisk kvantitet som kan transporteras mycket långt. Det elektromagnetiska rörelsemängdsmomentet är alltså i princip mätbart överallt och inte bara i strålkällans närhet.

Den kanske mest välkända läroboken i elektromagnetism på avancerad akademisk grundnivå är John D. Jackson, Classical Electrodynamics, som av många betraktas som standardreferensen i ämnet. I den senaste (tredje) utgåvan inkluderar Jackson en räkneuppgift (Problem 9.8, sidan 451) där studenten ombeds visa att det elektromagnetiska rörelsemängdsmomentet från en liten korsad elektrisk dipol transporteras ända ut till det som betecknas som fjärrzonen (och som inom standardlitteraturen för antenner ges en såväl kvalitativ som kvantativ definition; se t ex Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design). Faktum är att Jackson vill att studenten visar att det elektromagnetiska rörelsemängdsmomentet, liksom den betydligt mer välbekanta storheten elektromagnetisk rörelsemängd (effekt, energi), transporteras ända ut till oändligheten, d v s fjärrzonens allra yttersta (och i praktiken ouppnåeliga) gräns där vågorna är helt plana och transversella.

Elektromagnetiskt rörelsemängdsmoment – också kallat elektromagnetisk tidimpulsmoment – består vanligtvis av två var för sig fysikaliskt olika och oberoende kvantiteter. Dels spinnimpulsmomentet (spin angular momentum, SAM), vilket är den fysikaliska beteckningen på det som radioingenjörer och optiker brukar kalla vågpolarisation (vänster- eller högerrotation av de elektriska fältvektorerna), dels det avsevärt mer subtila och till för 15 år sedan så gott som outforskade banimpulsomomentet (orbital angular momentum, OAM). Eftersom dessa två kvantiteter är oberoende av varandra går det att generera strålning som innehåller enbart SAM (polariserade moder som utbreder sig rätlinjigt), enbart OAM (opolariserade ”korkskruvsmoder”) eller både SAM och OAM (polariserade ”korkskruvsmoder”).

Vad Jacksons närmast triviala räkneuppgift (och betydligt mer sofistikerade exempel i mer avancerad litteratur) visar är att de ”extra” frihetsgrader hos det elektromagnetiska fältet som OAM tillhandahåller finns tillgängliga i fjärrzonens allra yttersta gräns även i fallet med en (i konventionell Poyntingmening) så synnerligen bred strålningskägla/strålningslob (”beam”) som den som genereras av en enda korsad dipol. Notera att dipolens strålningskägla (i Poyntingmening) är extremt mycket bredare än strålningskägla hos en välkollimerad laserstråle, som vanligtvis är så smal att den kan beskrivas i den så kallade paraxialapproximationen.

OAM kan alltså bäras av alla former av beamar oberoende av deras lobbredd och inte bara av smala ”strålar”! Detta beror på att OAM är en inneboende egenskap hos strålningen. Värt att påpeka i sammanhanget är att engelskans begrepp ”beam” inte skall förväxlas med begreppet ”ray” trots att båda lite slarvigt brukar översättas med svenskans ”stråle” (vilket ofta förknippas med geometrisk optik men som är något helt annat).

Som Jackson indikerar i den ovannämnda räkneuppgiften, i form av en ledning (”Hint”) till problemlösaren, bidrar den del av det elektriska fältet som dominerar i fjärrzonen överhuvud taget inte alls till det rörelsemängdsmoment som transporteras ut till oändligheten! Det är alltså bara de med avståndet från sändaren snabbt avklingande icke-transversella komponenterna av det elektriska fältet i närzonen och den intermediära zonen som genererar det icke-avklingande totala rörelsemängdsmomentet i fjärrzonen! Det är möjligen detta faktum, vilket vid första åsynen kan verka paradoxalt, som förbryllar Leif Åsbrink.

Värt att notera är också att det finns ett flertal sätt att i fjärrzonen detektera OAM och de azimutalt ortogonala och av varandra ömsesidigt oberoende topologiska egentillstånd (”korkskruvsmoder”) som OAM gör tillgängliga där. Ortogonalitet innebar i praktiska termer att de olika OAM-moderna utbreder sig oberoende av varandra och att det därför på samma frekvens i princip går att överföra många kanaler utan att de interfererar med varandra. Detta är en välkänd och ofta utnyttjad teknik när det gäller SAM (vågpolarisation). Där är antalet oberoende kanaler begränsat till två (två ortogonala polarisationstillstånd) medan OAM medger fler kanaler. I praktiska OAM-tillämpningar använder man dock hellre andra metoder som utnyttjar samma topologiska ortogonalitet. Matematiskt kan detta uttryckas som att den överföringsmatris (Jonesmatrisen) som beskriver transmission från sändare till mottagare vid utnyttjande av OAM-frihetsgraderna går från att vara 2×2 till att vara (2j+1)×(2j+1) där j är OAM-”kvanttalet” (vilket kan vara stort); se L. Allen et al, ”Matrix formulation for the propagation of light beams with orbital and spin angular momenta”, Physical Review E, Vol. 60, sid 7497–7503, 1999.

I sin kommentar föreslår Leif Åsbrink en detektionsmetod som bygger på konventionell antenn- och radioteknik. Man kan kanske förledas att felaktigt dra slutsatsen att mottagarantennen måste täcka hela den strålningslob (i Poyntingmening) som utstrålas (i samma Poyntingmening) från sändaren för att mottagaren skall kunna detektera OAM. Men så är inte fallet. Och det går dessutom att konstruera strålningslober av andra bevarade kvantiteter än de som definieras genom Pontingvektorn/rörelsemängden. Det går t o m utmärkt att låta de fyra oberoende paraboloantennerna som Åsbrink använder i sitt exempel var och en sända ut elektromagnetisk strålning som innehåller OAM. Denna kombination av OAM och MIMO är något som ännu inte utnyttjats. Metoder finns beskrivna i den vetenskapliga litteraturen. Andra studeras av olika forskargrupper runt om i världen, inklusive vår egen i Uppsala.

Som det enkla Jacksonexemplet illustrerar är det alltså den radiella, icke-transversella komponenten av det elektriska fältet i närzonen som ger upphov till OAM i fjärrzonen. Men att direkt mäta denna radiella komponent av det elektriska fältet i fjärrzonen för att konstatera att vågfronten inte är plan är en långt ifrån optimal metod att detektera OAM eftersom OAM ger upphov till betydligt kraftigare och mer lättdetekterade topologiska signaturer i fjärrzonen. Åsbrinks metod är därför lite av ”att gå över ån efter vatten”. I synnerhet om man, som han föreslår, använder traditionella antenner som bygger på elektroniska konduktionsströmmar (d v s på kraftverkan och rörelsemängd hos laddningar) varur man beräknar de elektromagnetiska fälten. Bättre är att använda strålningaktuatorer och -sensorer (”antenner”) som direkt kan generera och detektera OAM (d v s kraftmomentverkan och rörelsemängdsmoment). Detta är analogt med den kapacitetshöjning som uppstår då man går från elektronik till spintronik genom att den senare tekniken använder material som medger att man utnyttjar elektronens spinn som en ”extra” frihetsgrad.

I det mycket intressanta föredrag som föregick undertecknads eget på GigaHertz 2008, och som Gunnar Lilliesköld också refererar i EiN, beskrev Johan Åkerman, KTH, hur man med utnyttjande av spinnkraftmoment hos elektroner kan konstruera effektivare oscillatorer. I mitt föredrag visade jag hur man på analogt sätt kan utnyttja spinnkraftmomentet hos fotoner (elektromagnetiska fält) för att konstruera effektivare ”antenner” utan att man för den skull behöver blanda in kvantfysik (även om kvantbilden ofta är att föredra eftersom den är mer pedagogisk). Å andra sidan visas experimentellt i en artikel som publicerades för några veckor sedan (Julio T. Barreiro et al, ”Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding”, Nature Physics, Vol 4, sid 282-286, 2008), att man med utnyttjande av OAM i kvantkommunikation lyckats spränga den hittills vedertagna gränsen för kanalkapacitet.

Det är alltså ingen tvekan om att elektromagnetisk OAM är en mycket intressant kvantitet som bör studeras närmare. Inte minst i radioområdet där den hittills är underutnyttjad och där Sverige tidigare gjort viktiga genombrott.

Bo Thidé

Två uppfattningar

Leif Åsbrink kommenterar detta med ett räkneexempel:

Anser Bo Thidé att man skulle kunna överföra många, oberoende kanaler med OAM över ett avstånd på 30 km, i ett 20 MHz brett spektrum runt 1 GHz när det krävs att radiolänkstationen ryms i en sfär med diametern 2 meter?

Med 10 W och vettig kodning kan man uppnå en 50 Mbit/s. Med konventionell teknik kan man utnyttja två ortogonala polarisationer för samtidig överföring av två oberoende kanaler inom samma frekvensband. Dock blir signalbruset 3 dB sämre i vardera kanalen om den totalt utsända effekten fördelas på två kanaler. Man måste då förändra kodningen och får i stället två datakanaler med vardera 25 megabit per sekund.

Bo Thidé och hans grupp antyder att OAM kan öka antalet överförda databitar per sekund drastiskt utan ökat frekvensspektrum. Det jag velat påpeka är att detta inte låter sig göras när man kräver att ”radiolänkstationerna” inklusive antenner måste rymmas inom en liten volym.

Självklart bevaras det elektromagnetiska banimpulsmomentet ut i oändligheten. Det betyder inte att det kan detekteras med en liten anordning i en omgivning med rumstemperatur.

Leif Åsbrink