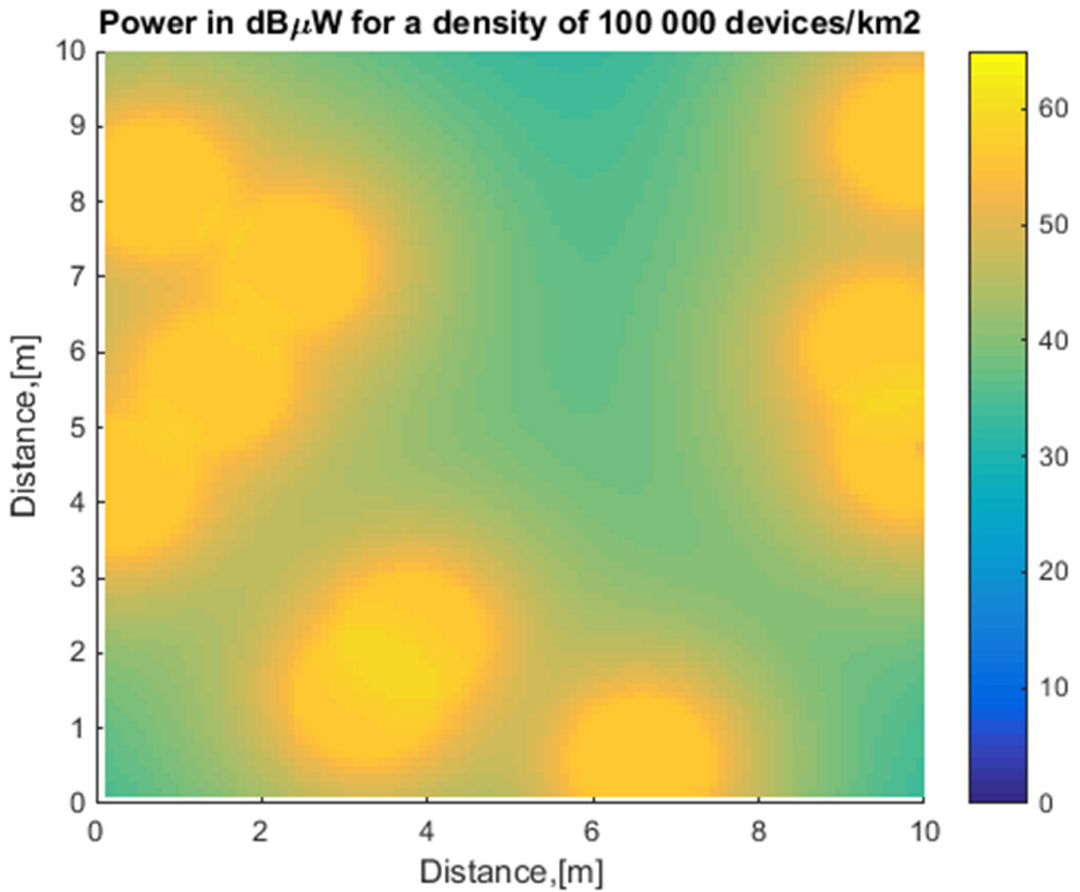


K. WIKLUNDH, P. STENUMGAARD



K. Wiklundh, P. Stenumgaard

Internet of Things – framtida EMC-utmaningar

Titel	Internet of Things – framtida EMC- utmaningar
Title	Internet of Things – future EMC challenges
Rapportnr/Report no	FOI-R—4550--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2017
Antal sidor/Pages	29
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	4. Informationssäkerhet och kommunikation
FoT-område	
Projektnr/Project no	E720643
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Den tekniska utvecklingen för Internet of Things (IoT) kommer att påverka området elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) på ett radikalt sätt och kan utgöra den största utmaningen för EMC-området sedan dess start för omkring 100 år sedan. I detta arbete lyfts och diskuteras några av dessa nya utmaningar. Arbetet visar att dagens metoder för att uppnå EMC måste vidareutvecklas för att hantera de utmaningar som kommer att uppstå till följd av ett massivt införande av trådlösa enheter. Utvecklingen kommer att skapa en elektromagnetisk miljö med tät samlokalisering av utrustningar och scenarier som är högst dynamiska, flexibla och oförutsägbara. Ytterligare en utmaning är att IoT-tekniken kommer att använda betydligt högre frekvenser än vad som provas i dagens standardiserade EMC-prov både vad gäller emission och immunitet. Arbetet visar att de utrustningstätheter som förutses troligen kommer att påverka den allmänna elektromagnetiska störningsnivån och kan orsaka allvarliga störningsproblem.

Nyckelord: Internet-of-Things, elektromagnetisk kompatibilitet, EMC.

Summary

The technical development towards the full vision of the Internet of Things (IoT) will affect the area of Electromagnetic Compatibility (EMC) in a radical way and may be the most challenging issue for the EMC area since it was born about 100 years ago. In this work, some of these new challenges are highlighted and discussed. The methodology in achieving EMC has to be further developed in order to handle the challenges that emerge as a result of the mass increase of wirelessly consumer devices, dense co-located and in scenarios characterized by being highly dynamic, flexible and non-predictable. Another overall challenge is that IoT products will be operating at considerably higher frequencies than standard EMC testing is done for today. This will directly affect the methodology and equipment for both emission and immunity testing. Results of interference consequences of the increased density of co-located devices are shown and the conclusion is that the expected density levels may cause severe interference problems in some cases.

Keywords: Internet-of-Things, electromagnetic compatibility, EMC.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Utveckling av Internet of Things	8
2.1	Civil utveckling.....	8
2.2	Militär utveckling.....	9
3	Standarder och protokoll för trådlös kommunikation	11
4	EMC-utmaningar	13
4.1	Betydligt högre frekvenser än vad som används idag	13
4.2	Olicensierade kontra licensierade band	13
4.3	Kort- kontra långräckviddiga nät	14
4.4	Höjning av störningsnivån	15
5	Sammanfattning	20
6	Referenser	21
7	Appendix	23
7.1	Korträckviddiga standarder	23
7.2	Långräckviddiga standarder	25
7.2.1	Ej 3GPP	25
7.2.2	3GPP	27

1 Inledning

Den starka civila utvecklingen inom trådlös telekommunikation för med sig en rad nya koncept och teknologier som kommer att påverka samhället i stort. Det är speciellt den ökade användningen av WiFi-system och utvecklingen av 5G inklusive Internet of Things (IoT), som kommer att utgöra de stora förändringarna. Utvecklingen skapar nya teknologier och nya tillämpningar då det uppkopplade samhället formas. Den starka utvecklingen bidrar också till att den redan befintliga infrastrukturen vidareutvecklas, ny infrastruktur tillkommer och antalet uppkopplade enheter ökar, vilket skapar stora tillverkningsvolym, som i sin tur pressar ner priset på tekniken. Termen IoT refererar till konceptet med uppkopplade vardagsföremål mot Internet. Utvecklingen är i full gång och redan idag är det vanligt förekommande att exempelvis web-kameror och lampor är uppkopplade och att hushållsel och hushållsapparater kan fjärrstyras. Om några år förutses att alla möjliga typer av apparater och sensorer är uppkopplade. Föremålen kan antingen sammankopplas trådbundet eller via ett trådlöst nätverk mot internet för att sedan kunna utbyta data.

Utvecklingen står inför en rad utmaningar, varav området elektromagnetisk kompatibilitet (eng. Electromagnetic Compatibility EMC) är ett av många. Det övergripande målet med elektromagnetisk kompatibilitet är att elektriska utrustningar och radiosystem ska kunna fungera tillsammans i en gemensam elektromagnetisk miljö. En viktig del för att uppnå detta är att produkter utvecklas med beprövade designkriterier för att sedan uppfylla standarder eller regler. Detta tillvägagångssätt är ofta en förutsättning för att uppnå EMC, åtminstone för statiska fall där scenariot inte förändras signifikant över tiden. Det finns dock situationer då det inte är tillräckligt att utrustningar uppfyller EMC-kraven för att uppnå EMC och uppgiften blir ännu svårare i scenarier som är mera oförutsägbara till sin natur. Regulatorisk omfattas radiomodulerna, vilka är en nödvändig del hos de uppkopplade vardagsföremålen, av radioutrustningsdirektivet [1], men EMC-standarderna är tyvärr inte anpassade mot den utveckling som är på gång.

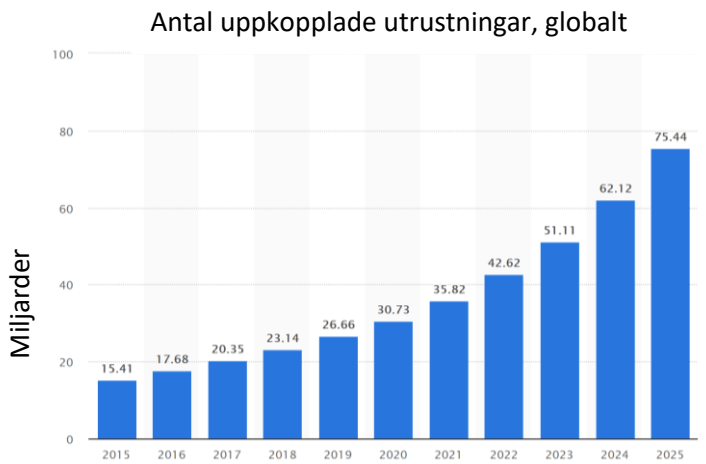
Rapporten beskriver några av de utmaningar som EMC-området kommer att ställas inför de kommande åren. Rapporten visar bland annat att vi kan förvänta oss en ökning av störningsnivån till följd av en avsevärd ökning av uppkopplade utrustningar i samhället och att detta i vissa fall kan orsaka svåra störningsproblem. Rapporten pekar också på att nya EMC-standarder behöver utvecklas, då IoT- och 5G-utvecklingen går mot att använda betydligt högre frekvenser än vad som används idag. Innehållet har delvis också presenterats i [41].

2 Utveckling av Internet of Things

2.1 Civil utveckling

I utvecklingen mot IoT kan vi förutse en kraftig ökning av trådlös teknik. Visionen av nästa mobiltelefonistandard, 5G, kan ses som den nödvändiga tekniska möjliggöraren för att IoT ska utvecklas i full skala. Utvecklingen av 5G förväntas bana väg för det så kallade Networked Society, och en framtida digital värld, där en global bredbandsinfrastruktur stödjer trådlösa tillämpningar inom alla ekonomiska sektorer. Prognoser visar att den trådlösa delen av den globala internettrafiken kommer att växa från cirka 50% idag, till cirka 75%, år 2020, och de första 5G-produkterna förväntas vara tillgängliga år 2020 [5]. Antal utrustningar, och därmed tätheten (antalet utrustningar/km²) av utrustningar, förväntas öka, vilket får konsekvenser för EMC-området.

Utveckling inom teknikområdet IoT kommer att skapa nya utmaningar för EMC-sektorn. Visionen för IoT innebär nya tillämpningar i nästan alla samhällssektorer. Exempel på tillämpningar är smarta städer, e-hälsa, smarta hem, smarta elnät, jordbruk, intelligenta transportsystem (ITS), logistik, industriella kontrollsystem, miljöövervakning, utbildning, underhållning och media [2]. Prognoser för mängden anslutna enheter görs kontinuerligt av olika aktörer. För några år sedan var prognoserna av storleksordningen 50 miljarder enheter år 2020. Sedan dess har många prognoser ansetts vara alltför optimistiska [4]. Fig. 1 visar ett mer realistiskt exempel på nuvarande prognoser [3].



Figur 1 Prognos över totala antalet uppkopplade utrustningar i världen [3].

Tabell 1 Förväntad täthet av uppkopplade IoT-utrustningar i smarta städer [5].

Tillämpningar	Täthet [Antal utrustningar/km ²]
Vattenmätare	10000
Elmätare	10000
Gasmätare	10000
Godisautomater	150
Hyrckelsystem	200
Hyrbilssystem	2250

Den största tillväxten i Figur 1 beror på en ökande andel IoT-applikationer, medan tillväxten av PC, laptop och mobiltelefoner beräknas till enbart några procent från 2016 till 2020. IoT-utvecklingen kommer att skapa en ny typ av komplexa samlokaliseringsscenarioer. Nya elektroniska utrustningar, både icke trådlösa och trådlösa, kommer att vara samlokaliserade nästan överallt i samhället, och dessa scenarier kommer att vara mycket oförutsägbara och dynamiska, och bero på konsumenternas vanor [8]. Antalet samlokaliserade enheter per områdesenhet förväntas bli upp till 10 000 stycken/km² för miljöer som smarta städer [5], se Tabell 1. Tillförs ytterligare applikationer för smarta hem och underhållning kan tätheten öka i storleksordning med en faktor 10-20, till cirka 200 000 enheter/km² [7], vilket resulterar i mycket komplexa samlokaliseringsscenarioer för EMC.

2.2 Militär utveckling

Konceptet IoT har de senaste åren även diskuterats för användning inom den militära domänen. Inom Nato finns aktiviteten IST-147 med rubriken ”*Military applications of Internet of things*”. Förhoppningen är att omhänderta och, på ett intelligent sätt, dra nytta av sensorinformation och vidareutveckla den, gärna med hjälp av artificiell intelligens. Denna förhoppning har stora likheter med visionen för det nätverksbaserade försvaret från 2000-talet. IST-147 startade i januari 2016 och kommer att pågå till december 2018 [9]. Aktiviteten undersöker möjligheterna att använda tekniker för IoT för militära tillämpningar, bland annat för (1) logistik, (2) omvärldsuppfattning (eng. situational awareness), och (3) medicinska tillämpningar ämnade för försvaret. Arbetet bygger vidare på en tidigare aktivitet, IST-ET-076 med rubriken ”*Internet of Military Things*”, som undersökte möjliga militära tillämpningar [42]. Denna aktivitet hade dock mer fokus på säkerhet, tjänstarkitektur och integration mot andra system.

Även DARPA har tagit flera initiativ inom området. I en av problemställningarna uppger DARPA att trådlös uppkoppling är en kritisk komponent för en mängd olika applikationer, allt från bredbandskommunikation till radar och situational awareness. De har därför speciellt uppmanat utförarna att adressera: Vilken teknik kan bidra till att säkerställa optimal och säker/robust användning av det alltmer överbelastade elektromagnetiska spektrumet? [10].

DARPAs N-ZERO-projekt har riktat in sig på tillämpningar med låg energiförbrukning och har uppmanat utförarna att utveckla utrustningar med låg energiförbrukning för tillämpningar som förutsätter en relativt liten bandbredd. Designprincipen liknar den som ligger bakom många LPWAN¹-tekniker (som exempelvis Sigfox och LoRa, se avsnitt 7.2.1), som är utvecklade för att hålla nere energiförbrukningen bland annat genom en låg uppdateringsfrekvens. I N-ZERO har man även fokus på så kallad uthållig avkänning [11]. Istället för att schemalägga sensorerna, så att dessa skickar data med fasta intervaller, ska de både kunna ha kontinuerlig mottagning, men även kunna gå in i ett viloläge för att spara ström. Forskningen är inriktad på två områden:

- Sovande, men medvetna, sensorer som kan väckas vid behov.
- Radiomottagare, som ständigt lyssnar efter signaler, men förbrukar lite ström när överföring inte sker.

Målet är att sensorerna konsumera mindre än 10 nW i utrustningens viloläge, vilket uppskattas till en 1000-faldig förbättring jämfört med dagens moderna sensorer [11].

Ett annat stort forskningsprogram är det så kallade Internet of Battlefield Things (IoBT), som är finansierat av US Army. Programmet fokuserar inte på att utveckla ny hårdvara, utan snarare på att utnyttja befintliga utrustningar och att vidareutveckla dem för användning i ett militärt nätverk. Visionen för forskningsprogrammet är bland annat att IoBT ska kunna nyttjas tillsammans med förlösa system och artificiell intelligens och därigenom uppnå en förbättrad försvarsförmåga [12].

¹ LPWAN: Low-Power Wide-Area Network

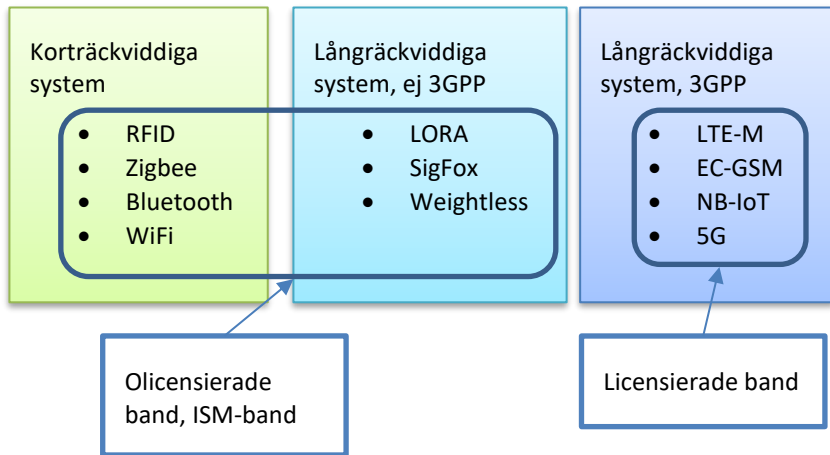
3 Standarder och protokoll för trådlös kommunikation

Idag finns det en mängd trådlösa tekniker för IoT-applikationer. I Appendix presenteras några av de vanligaste standarderna som idag används för IoT. De klassificeras efter deras förmåga till räckvidd och vilken typ av frekvensband de är tänkta att användas i, se Figur 2 [13]. Räckvidderna som uppges ska ses som ungefärliga. Räckvidderna beror starkt på i vilken miljö de används och för ett och samma system kan därför olika värden på kommunikationsräckvidd anges i olika referenser. Bland de långräckviddiga systemen är några utvecklade inom 3GPP:s regi. 3GPP är det standardiseringsorgan inom vilket mobiltelefonistandarderna tas fram. De långräckviddiga standarder som är utvecklade inom 3GPP:s regi är också de enda systemen som är tänkta att användas i licensierade band. Övriga använder olicensierade band, som exempelvis 2.4, 5.8 GHz-bandet eller 868 (Europa)/915 (USA) MHz.

Värt att notera är att de trådlösa standarderna som finns framtagna idag och som tas upp här är avsedda att användas i frekvensbandet upp till och med 6 GHz. Planen är dock att använda betydligt högre frekvenser för IoT. Hur standarderna och teknikerna kommer att anpassas för detta är ännu oklart.

Ytterligare en aspekt som är intressant angående de olika standarderna är att några av dem är baserade på patenterade lösningar och kan innebära att en licenskostnad krävs för att använda tekniken. Denna aspekt kan ha påverkan på vilken typ av teknik som väljs för en viss tillämpning.

Ett begrepp som ofta används för vissa av standarderna eller teknikerna är Low Power Wide Area Network (LPWAN). Det är benämningen för ett trådlöst nätverk som täcker ett större område och har relativt lång räckvidd och sammankopplar objekt som exempelvis sensorer som vanligtvis strömförsörjs med batteri. I många sensorapplikationer vill man att noderna ska ha en batteridrift på minst 5-10 år. Gemensamt är att utrustningarna sänder med relativt låg datatakt (0.3-50 kbit/s per utrustning [14]).



Figur 2 Klassificering av trådlösa standarder.

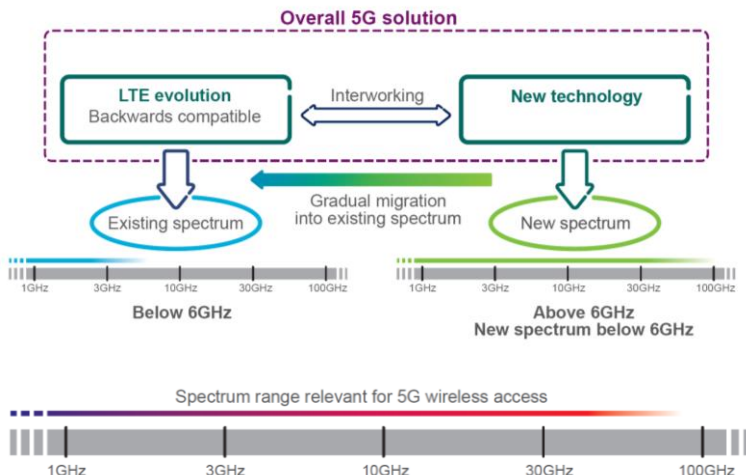
4 EMC-utmaningar

4.1 Betydligt högre frekvenser än vad som används idag

5G-system och IoT-enheter planeras att användas på betydligt högre frekvenser än vad dagens EMC-standarder täcker för emission och immunitet. Inom visionen för 5G planeras att använda frekvenser upp till cirka 30 GHz för utomhusmiljöer och upp till ca 90 GHz för inomhustillämpningar [38], se Figur 3. Detta kommer givetvis att påverka förmågan att uppnå EMC både vad gäller immunitet och utstrålad emission. Den nuvarande EMC-standarderna täcker, med några speciella undantag, emission och immunitet upp till 18 GHz. Om inte dagens EMC-standarder anpassas kommer således både immunitet och utstrålad emission inte att hanteras för ett brett spektrum av nya frekvensband. Vidare måste instrument och annan utrustning för EMC-testning utvecklas och modifieras för att klara de nya banden högre upp i frekvens.

4.2 Olicensierade kontra licensierade band

Licensierade frekvensband innebär att enskilda företag (t ex telekommunikationsoperatörer) betalar en licensavgift för ensamrätt att sända på ett speciellt frekvensband i ett visst geografiskt område. Licensiering är därför ett sätt att säkerställa att trådlösa tjänster inte stör varandra [39]. För att använda



Figur 3 Vision om nya frekvensband för 5G-utvecklingen, [38].

olicensierade frekvensband krävs däremot inget tillstånd. Istället behöver användarnas utrustningar uppfylla vissa regler som gäller för det specifika frekvensbandet. Typiskt regleras den maximala sändareffekten. ISM-banden är exempel på olicensierade frekvensband. ISM står för industriella, vetenskapliga och medicinska radioband och banden är reserverade internationellt för användning av radiofrekvent energi för industriella, vetenskapliga och medicinska ändamål. Exempel på tillämpningar i dessa band är mikrovågsugnar och medicinska diatermiskiner, men där finns också exempelvis WiFi-system, Bluetooth, ZigBee, trådlösa bilnycklar, larmsystem och fjärrkontroll för olika produkter.

De olicensierade banden är alltid en utmaning ur EMC-perspektiv, särskilt för applikationer och tjänster med krav på tillgänglighet och robusthet. Eftersom de olicensierade banden är öppna för alla som följer de gällande reglerna, kan den elektromagnetiska miljön variera enormt mellan olika geografiska områden. I stads- och industrimiljö samt i andra områden med en stor andel trådlösa enheter tenderar dessa band att bli överutnyttjade, vilket orsakar olika typer av störningsproblem; exempelvis tappade paket eller tidsfördröjningar för överförda paket. Med den förväntade massökningen av IoT-enheter kommer beläggningen på de olicensierade frekvensbanden att öka ytterligare. Detta eftersom det är enkelt att införa nya tjänster (för den som utvecklar och säljer tjänsten) och att använda tjänsten (för användaren) samt att det ger en billig lösning då hårdvaran ofta är billig och enkel att införskaffa för olicensierade band.

4.3 Kort- kontra långräckviddiga nät

Utformningen av trådlösa nätverk för IoT-applikationer innefattar ofta en kompromiss mellan flera motstridiga krav. Sådana krav kan vara uppdateringsfrekvenser för sensorerna, informationsstorlek för den information som ska skickas, typ av nätverksanslutning, energiförbrukning och batterilivslängd, bandbredd, frekvensband, hårdvarukostnad, driftskostnad och underhållskostnad. Prognoser pekar på att LPWAN kommer att dominera den trådlösa uppkopplingen för IoT-utrustningar år 2025 [6]. Flera olika tekniklösningar kommer sannolikt att existera och det är troligt att ingen enskild framväxande teknik kommer att dominera. Förväntningarna på framtidens IoT-nät är att dessa har stor geografisk täckning (nationell), batterilivslängd på upp till 10 år, datahastigheter från hundratals till tiotals kilobits per sekund (kbps). Hårdvarukostnaden förväntas ligga på ungefär \$ 5 per enhet [6]. LPWAN kommer förmodligen att flyttas från proprietär teknik till standardiserad smalbandsteknik, som exempelvis NB-IoT [6]. Från ett EMC-perspektiv kommer lågeffektsutrustningar som används i miljöer med många andra utrustningar att vara utmanande av två skäl. För det första kommer en hög utrustningstäthet att skapa en högre störningsnivå och för det andra kommer utrustningar som arbetar

med låga effekter att ha en lägre marginal mot störningar, vilket betyder att de blir mer känsliga för elektromagnetisk störning.

4.4 Höjning av störningsnivån

Med en massiv ökning av IoT-utrustningar kommer störningsnivåerna i samhället att öka. I det här avsnittet analyseras tre olika ISM-band, 433 MHz, 868 MHz och 5,8 GHz, och vi studerar hur olika utrustningstätheter höjer den mottagna störningsnivån i ett område. Utrustningstätheten antas vara antingen 10 000 eller 100 000 enheter per kvadratkilometer, där det senare värdet kan anses rimligt för områden med ett stort antal IoT-tillämpningar, exempelvis köpcentrum. De olika frekvensbanden karaktäriseras av olika typiska värden på sändareffekt, se Tabell 2.

I analysen antas att IoT-utrustningarna är slumpmässigt placerade i ett område på 10 m x 10 m, med en antennhöjd på 1 m. Antennen på utrustningen antas vara isotrop med 0 dB i antennförstärkning. Med tanke på att överföringen från utrustningen sannolikt kommer att reflekteras i omgivande objekt använder vi en två-stråle-modell för att modellera vågutbredningen. Detta innebär att överföringen består av en direktvåg och en reflekterad våg och den mottagna effekten P_r blir därmed [40]

$$P_r \approx 4 \frac{P_t A_m}{4\pi r^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} \right), \quad (1)$$

där P_t är sändareffekt, A_m är effektiv antennarea, h_2 och h_1 är höjd för sändarens och mottagarens antenner, λ är våglängd och r är avstånd mellan sändare och mottagare. Uttrycket i (1) trunkeras till maximalt 2 gånger sändningseffekten, vilket kan uppstå vid mycket små avstånd. I de analyserade scenarierna antas att enheterna sänder kontinuerligt och på samma frekvens. Figur 4 - Figur 7 visar mottagen störningseffekt i dB μ W som orsakas till följd av IoT-utrustningarna i scenarierna för olika utrustningstätheter, sändareffekt och frekvens. IoT-utrustningarna visar sig som lysande glödlampor i figurerna och

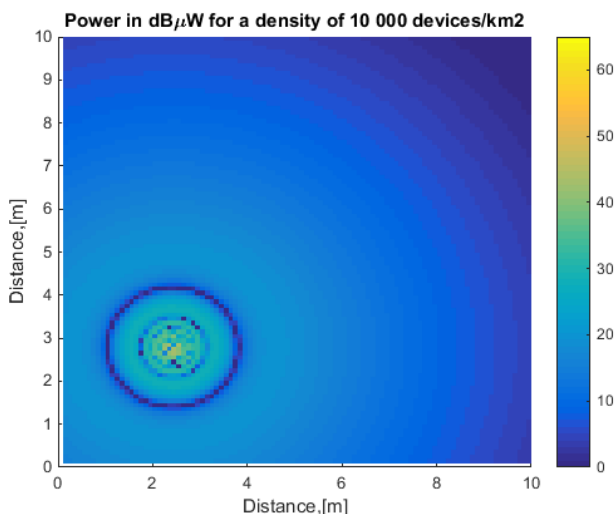
Tabell 2 Sändareffektsantaganden för analysen.

Frekvens	Sändareffekt
433 MHz	10 mW
868 MHz	25 mW
5.8 GHz	200 mW

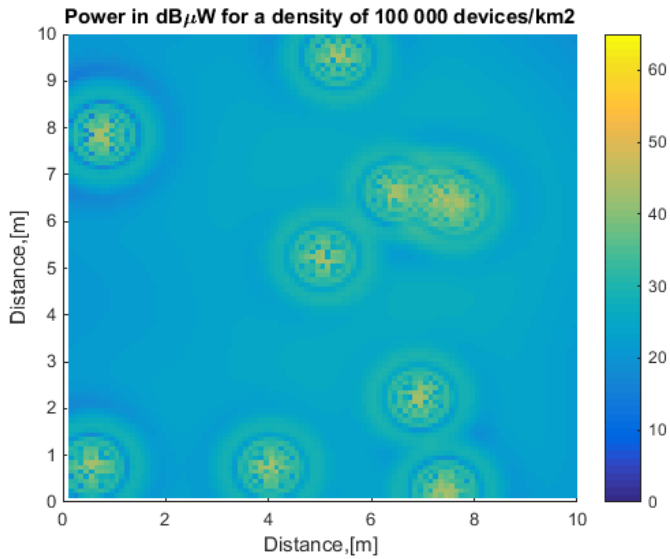
effekten P_r från dem minskar sedan med avståndet radiellt ut från utrustningens position. I Figur 4 kan vi se ett vågmönster som beror på periodisk konstruktiv och destruktiv interferens mellan direktvågen och den reflekterade vågen radiellt ut från utrustningen. Omkring 10 m ut från enheten reduceras effekten till 0-10 dB μ W då utrustningstätheten är 10 000 enheter per kvadratkilometer,

I ett tätare scenario med 100 000 utrustningar per kvadratkilometer har effektnivåerna i områdena ökat, se Figur 5 - Figur 7. Den mottagna effekten är beräknad för frekvensbanden 433 MHz, 868 MHz och 5,8 GHz. Det bör noteras att förutom frekvenskillnaden, skiljer också sändareffekten i de olika fallen. I Figur 7 är sändareffekten 200 mW och för en sådan hög effekt lyser IoT-utrustningarna som glödlampor.

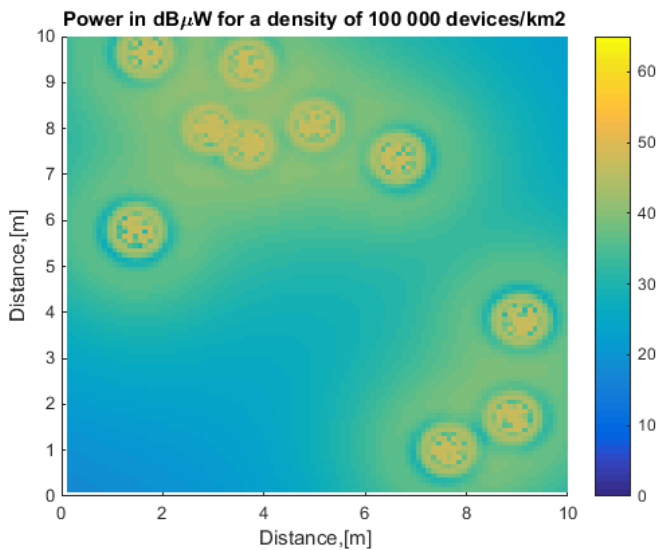
I Figur 8 presenteras fördelningsfunktionen för den mottagna störningseffekten för ett område på 10m x 10m. Funktionen visar sannolikheten för att den mottagna störningseffekten uppnår olika nivåer i området. Det är speciellt intressant att se att den lägsta nivån i området ökar på grund av tätheten av utrustningar. I Figur 8 kan vi även se att en effektnivå på 1 dB μ W överskrids på 90% av platserna i området då densiteten är 10 000 vid 433 MHz, medan den är 22 dB μ W för en densitet på 100 000 utrustningar/km². Detta indikeras i Figur 8 med en linje vid sannolikhetsnivån 0.1. Genom att öka utrustningsdensiteten med en faktor 10, ökas den lägsta nivån i området med 20 dB, i detta fall. Vid 868 MHz ökar effektnivån med 24 dB och vid 5,8 GHz är ökningen cirka 18 dB, då densiteten ökar från 10 000 till 100 000 utrustningar/km². Höjningen av störningseffekten i området innebär en stor risk för att mottagningen blockeras.



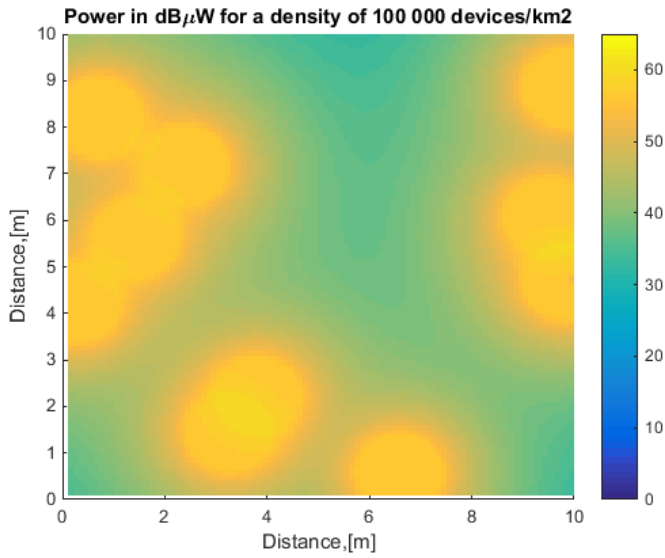
Figur 4 Mottagen effekt för en yta av 10 m x 10 m, med sändareffekt 10 mW vid 434 MHz och en utrustningstäthet på 10 000 per km².



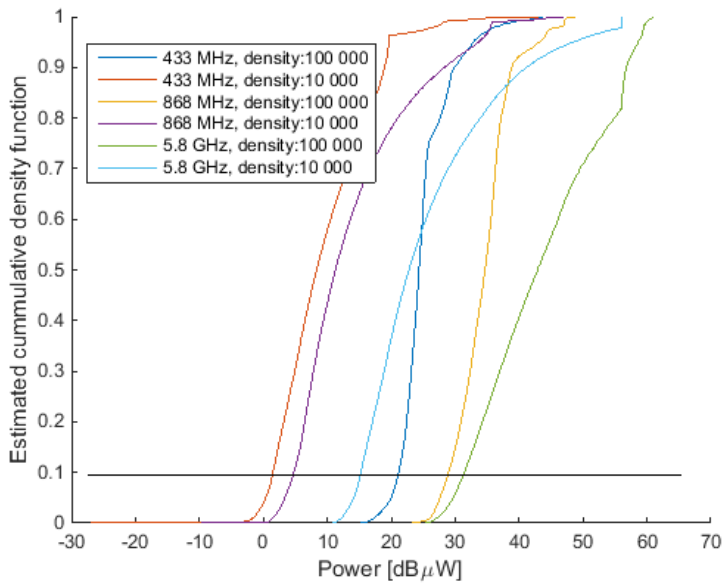
Figur 5 Mottagen effekt för en yta av 10 m x 10 m, med sändareffekt 10 mW vid 434 MHz och en utrustningstäthet på 100 000 per km².



Figur 6 Mottagen effekt för en yta av 10 m x 10 m, med sändareffekt 25 mW vid 868 MHz och en utrustningstäthet på 100 000 per km².



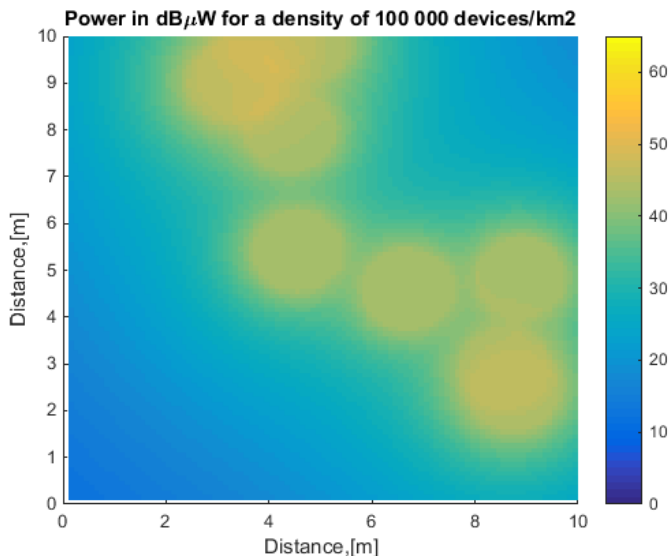
Figur 7 Mottagen effekt för en yta av 10 m x 10 m, med sändareffekt 200 mW vid 5.8 GHz och en utrustningstäthet på 100 000 per km².



Figur 8 Estimerad fördelningsfunktion av den mottagna störningseffekten för ett område på 10 m x 10 m.

För att analysera konsekvenserna av den resulterande störningsmiljön antar vi att ytterligare ett system som arbetar på frekvensen 868 MHz placeras i samma område. Systemet har typiskt en känslighetströskel på $-76 \text{ dB}\mu\text{W}$ och eftersom systemet har en uteffekt på $25 \text{ mW} = 44 \text{ dB}\mu\text{W}$ ska dess radiomottagare kunna ta emot effekter på $44 \text{ dB}\mu\text{W}$ ner till $-76 \text{ dB}\mu\text{W}$. För ett område med en utrustningsdensitet på 100 000 stycken per km^2 kommer 90 % av området att ha en störningsnivå på $28 \text{ dB}\mu\text{W}$ eller högre. Systemet ska normalt kunna ta emot signaleffekter ner mot känslighetströskeln på $-76 \text{ dB}\mu\text{W}$. Den höga utrustningsdensiteten har istället ökat störningsnivån avsevärt, vilket får till följd att kommunikationsräckvidderna kommer att minska kraftigt.

Som jämförelse analyserar vi också hur den mottagna störningsnivån blir på 30 GHz. Vid detta frekvensband är det fortfarande oklart vilka sändareffekter som kommer att gälla. För analysen antas en sändareffekt på 10 mW. Vid denna frekvens är regndämpningen betydande och den reflekterande vågen kan påverkas av den så kallade grovheten (eng. *roughness*) i det reflekterande planet. I analysen antas att det inte regnar och att det reflekterande planet är helt slätt, varför samma vågutbredningsmodell som tidigare kan användas. I Figur 9 visas den mottagna effekten för en densitet på 100 000 utrustningar/ km^2 . För detta scenario överstiger effektnivån för 90% av området $1 \text{ dB}\mu\text{W}$ för en densitet på 10 000 utrustningar/ km^2 , medan den överstiger $19 \text{ dB}\mu\text{W}$ för en densitet på 100 000 utrustningar/ km^2 .



Figur 9 Mottagen effekt för en yta av 10 m x 10 m, med sändareffekt 10 mW vid 30 GHz och en utrustningstäthet på 100 000 per km^2 .

5 Sammanfattning

Utveckling inom IoT förväntas skapa en massökning av uppkopplade utrustningar, och därmed kommer tätheten av utrustningar att öka. Det kommer att skapa nya utmaningar för EMC-sektorn. Nedan sammanfattas tre betydande utmaningar inom EMC-området i och med utvecklingen mot IoT:

- Samlokaliseringsscenarierna präglas av högre utrustningstätheter. Vi har visat att den sammanlagda ökningen av störningsnivån i vissa fall kan orsaka svåra störningsproblem.
- IoT- och 5G-utvecklingen mot att använda högre frekvenser, upp mot 30 GHz och 90 GHz, kräver ytterligare utveckling av nya metoder, mätutrustning och krav för emissions- och immunitets EMC-standarder.
- En massiv ökning av trådlösa produkter kommer att öka beläggningen i de olicensierade frekvensbanden betydligt.

6 Referenser

- [1] Radioutrustningsdirektivet, Direktiv 2014/53/EU.
- [2] V. Angelakis, E. Tragos, Henrich C. Pöhls, A. Kapovits, A. Bassi, *Designing, Developing, and Facilitating Smart Cities: Urban Design to IoT Solutions*, Springer, 2017.
- [3] <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>
- [4] Amy Nordrum, “Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated”, IEEE Spectrum, Aug 2016.
- [5] “Ericsson Mobility Report”, November 2016.
- [6] “Gartner Identifies the Top 10 Internet of Things Technologies for 2017 and 2018”, Press release STAMFORD, Conn., February 23, 2016.
- [7] Ericsson Technology Review, Vol. 93, no. 3, 2016.
- [8] Peter Stenumgaard, “Social and Organizational Aspects on EMC for Internet of Things“ *Electronic Environment*, no. 4, 2016, pp. 28-30.
- [9] https://www.cso.nato.int/activity_meta.asp?act=8647
- [10] www.darpa.mil/news-events/2016-10-05
- [11] www.iotforall.com/darpas-take-iot-battery-problem-n-zero/amp/
- [12] sputniknews.com/military/201710121058178447-iot-battlefield-army-war/
- [13] J. C. Mazaira, B. S. Méndex de Vigo, “The response of the CSPs to the IoT burst – New and traditional communication provider’s response to the iot burst,” Telefonica, 2015.
- [14] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melià-Seguí, T. Watteyne, “Understanding the limits of LoRaWAN”, Januari, 2017.
- [15] <http://www.zigbee.org/>
- [16] Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EUETSI, EN 300 328 V2.1.1 (2016-11).
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/6LoWPAN>
- [18] <http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/zigbeeip/>
- [19] <https://www.wi-fi.org/>

- [20] <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [22] <https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/how-it-works>
- [23] <https://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/Ecma-340.pdf>
- [24] <https://www.iso.org/standard/56692.html>
- [25] www.link-labs.com/blog/sigfox-vs-lora
- [26] www.link-labs.com/blog/what-is-sigfox
- [27] www.link-labs.com/blog/sigfox-resource-page
- [28] A. Pal, B. Purushothaman, *IOT Technical Challenges and Solutions*, Artech House, 2016.
- [29] www.link-labs.com/blog/lora-faqs
- [30] www.link-labs.com/blog/what-is-weightless
- [31] <http://www.weightless.org/>
- [32] Discussion on different 3GPP MTC solutions, ECC PT1(16)037rev1, April 2016.
- [33] J. Schlien, D. Raddino, *Narrowband Internet of Things – Whitepaper*, Rohde&Schwarz.
- [34] www.3gpp.org/ctiot
- [35] www.gsma.com/iot/long-term-evolution-machine-type-communication-lte-mtc-cat-m1/
- [36] www.link-labs.com/blog/lte-iot-technologies
- [37] http://www.3gpp.org/images/articleimages/iot_summary_large.jpg
- [38] <https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf>.
- [39] Spectrum Policy and Planning - ICT Regulation Toolkit , <http://www.ictregulationtoolkit.org/toolkit/5.2>.
- [40] L. Ahlin, J. Zander, *Digital radiokommunikation – system och metoder*, Studentlitteratur, 1992.
- [41] K. Wiklundh, P. Stenumgaard, EMC Challenges for the Internet of Things, in Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2017.
- [42] <https://www.sto.nato.int/Lists/Activity/DispForm.aspx?ID=1569&ContentTypeId=0x010077D4688956E70346BD8BCAEEBE1231D8>

7 Appendix

I följande kapitel presenteras några av de vanligaste standarderna som idag används för IoT.

7.1 Korträckviddiga standarder

ZigBee baseras på IEEE 802.15.4 och är en industristandard för trådlösa nät. Datameddelanden sänds med relativt låga datahastigheter över avstånd på omkring 10-100 m, typiskt för ett hem eller en byggnad [15]. Det finns flera ZigBee-profiler, varav två är ZigBee PRO och ZigBee Remote Control (RF4CE). ZigBee/RF4CE sägs erbjuda låg effektförbrukning, hög säkerhet, robusthet och skalbarhet och anses lämplig för maskin-till-maskin- (M2M-) och IoT-applikationer. Den senaste versionen av ZigBee är den nyligen lanserade 3.0, som är en sammanslagning av de olika trådlösa ZigBee-standarderna i en gemensam standard. Enligt [16] är maximal effekt för systemet 100 mW eller 10 mW/Hz. Standarden används på ISM-banden 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) och 915 MHz (USA).

Ett begrepp i sammanhanget är 6LoWPAN, vilket är en standard för IPv6 över Low-Power Wireless Personal Area Networks [17]. 6LoWPAN-gruppen har definierat mekanismer för så kallad inkapsling (eng. *encapsulation*) och komprimering av kontrollinformation (eng. *header compression*), som tillåter att IPv6-paket skickas och tas emot i IEEE 802.15.4-baserade nätverk. 6LoWPAN används inom några av IoT-standarderna, eftersom det löser några problem som tidigare har funnits vid sändning av IP-paket över IEEE 802.15.4-nätverk.

Zigbee IP är ytterligare en Zigbee-version, som bygger på IEEE 802.15.4-standard, men som är avsedd för en komplett IPv6-baserad trådlös nätverkslösning som ger sömlös internetanslutning [18]. Zigbee IP körs över 6LoWPAN.

WiFi används för att trådlöst ansluta enheter som datorer och telefoner till Internet via en så kallad Internet-router. Bakom utvecklingen finns den icke-vinstdrivande WiFi Alliance [19]. Tekniken baseras på IEEE 802.11-standarderna och kan användas på ISM-banden vid 2.4 GHz och 5 GHz. I Tabell 3 visas en sammanställning av några olika versioner av standarden. Versionerna b, g och n av standarden används på 2.4 GHz-bandet. I många länder gäller att utsänd effekt för IEEE 802.11b/g är begränsad till 100 mW eller 5 mW/MHz. En ny version anpassad för IoT-applikationer är under utveckling och går under benämningen WiFi-HaLow [20]. Den är avsedd för tillämpningar som kräver låg effektförbrukning med längre kommunikationsavstånd. Versionen sägs vara tillgänglig 2018.

Tabell 3 Sammanställning av några versioner av IEEE 802.11.

Version	Frekvensband	Datatakt Mbit/s	Kommunikations- avstånd [m]
a	5 GHz	54	10
b	2.4 GHz	11	140
g	2.4 GHz	54	140
n	2.4/5 GHz	450	250
ah	900 MHz	8	100

Bluetooth är en trådlös teknikstandard som använder ISM-bandet vid 2.4 GHz för att överföra information över korta avstånd på vanligtvis 10 meter eller mindre. Tekniken var ursprungligen standardiserad som IEEE 802.15.1, men IEEE underhåller inte längre standarden [21]. Det finns huvudsakligen tre klasser av Bluetooth-enheter, se Tabell 4.

Utöver dessa finns Bluetooth Low Energy (BLE) [22], som är en variant som har lägre energiförbrukning än den traditionella Bluetooth och är därför mer anpassad mot IoT-applikationer. BLE är avsedd för tillämpningar som bara behöver sända och ta emot små mängder data med jämna mellanrum, som till exempel i fitness trackers, och smarta klockor. BLE går även under benämningen Bluetooth Smart och stöds av majoriteten av smartphones och datortillverkare.

Tabell 4 Sammanställning av Bluetooth-klasser [21].

Klass	Sändareffekt	Kommunikations- avstånd [m]
1	100 mW (20 dBm)	~100 m
2	2,5 mW (4 dBm)	~10 m
3	1 mW (0 dBm)	~1 m

Near Field Communication (NFC) är benämningen för de trådlösa anslutningsstandarderna ECMA-340 [23] och ISO/IEC 18092 [24], som använder magnetfältsinduktion för kommunikation mellan enheter som är mycket nära varandra. De behöver antingen helt komma i kontakt med varandra eller placeras några centimeter från varandra. ECMA-340 och ISO/IEC 18092 definierar både aktiva och passiva kommunikationslägen med induktivt kopplade enheter som arbetar på frekvensen 13.56 MHz.

7.2 Långräckviddiga standarder

7.2.1 Ej 3GPP

Det har funnits en viss kritik mot IoT- och M2M-tekniker, som bygger vidare på traditionella mobiltelefonistandarder. Mobiltelefoniteknologierna GSM, GPRS, 3G och LTE ger visserligen tillräcklig täckning för de flesta applikationer, men hårdvarukostnaden för utrustningen är hög. 3GPP-teknik och LTE-baserade varianter (som NB-IoT, se 7.2.2), som är under utveckling, baseras på gamla standarder och anses av många inte helt optimerade för många IoT-tillämpningar, speciellt vad gäller kostnad och energiförbrukning. GSM-baserade nätverk är ofta olämpliga för tillämpningar som behöver skicka korta meddelandestorlekar, vilket är typiskt i många användarfall för IoT. GSM-baserad teknik kan därför skapa betydande kostnader och leda till ineffektivitet i nätet. Kritiken har varit en stark orsak till att flera nya alternativa tekniker har utvecklats. Nedan beskrivs några av de föreslagna alternativa teknikerna.

Sigfox är en standard som är konstruerad för anslutning av lågenergienheter. Signalen har en mycket smal bandbredd och uppbyggd av DPSK²-modulation i upplänk och GFSK³ i nedlänk [25], [26]. Systemet sänder endast mycket små datamängder, 12 bytes, med en hastighet på 300 baud [26]. Systemet använder kanaler på 100 Hz i ett 200 kHz-band på licensfria band runt 900 MHz (868 MHz i Europa och 915 MHz i USA). Målsättningen är att erbjuda ett eget IoT-nätverk som täcker hela världen och bli en global LPWAN-operatör. Företagets nätverk finns för närvarande i 22 länder, som omfattar 1,3 miljoner kvadratkilometer och 340 miljoner invånare [27]. Kommunikationsräckvidden uppges vara ungefärligen 13 km, upp till 50 km [28]. Sigfox affärmodell är att själva eller att låta en operatör ansvara för infrastrukturen, för vilken de tar en liten avgift, istället för att tjäna pengar på utrustning [25]. Det betyder att det är fritt fram för företag att utveckla egen utrustning.

LoRa är skapad av LoRa Alliance och benämningen LoRa står egentligen för standarden av det fysiska lagret. Signalen baseras på så kallad spread spectrum,

² DPSK: Modulationsmetoden Differential Phase Shift Keying

³ GFSK: Modulationsmetoden Gaussian Frequency Shift Keying

men inte i traditionell mening [29]. LoRa använder en omodulerad bärvåg på vilken informationen bärs av signalens frekvens och signalen sprids på ett större frekvensområde. LoRa används i kombination med LoRaWAN som är MAC-protokollet. Systemet har flera signalbandbredder, som kan variera mellan 7.8 kHz och 500 kHz. Kommunikationsräckvidden kan variera från några kilometer i täta stadsområden upp till 15-30 kilometer på landsbygden. Tekniken är energisnål och möjliggör en lång livslängd med över 10 års batterilivslängd. Tekniken kan användas på licensfria band som 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz i Europa och 915 MHz i USA. LoRaWAN finns utbyggt i flera europeiska länder och städer. LoRa Alliance har en annan affärsmodell än Sigfox och har gjort en öppen specifikation av standarden. Däremot är vissa delar patenterade och idag är det endast företaget Semtech som får tillverka radioutrustningen [25], [29].

Weightless är ytterligare en aktör som utvecklar tekniker för LPWAN. Precis som för LoRa och Sigfox drivs utvecklingen av en intressegrupp som benämns för Weightless Special Interest Group (SIG). [30]. Det finns för närvarande tre publicerade standarder av Weightless: Weightless -P, Weightless -N och Weightless -W, som alla är avsedda för olika typer av användarfall. Weightless-N (eng. *narrow*) är en mycket smalbandig vågform som endast skickar information i upplänk. Tekniken är mycket lik Sigfox och nyttjar DBPSK⁴ i kombination med frekvenshopp [31]. Tekniken används på det olicensierade bandet runt 868 MHz i Europa, medan det sker på 915MHz i Nordamerika. Weightless-W (eng. *Wideband*) är en öppen standard som är utformat för att användas i lediga frekvensutrymmen, så kallade *white space*, avsedda för TV-sändningar i UHF⁵-bandet. Problemet är dock att dessa inte kan användas överallt och att det är mycket svårt att ha en och samma antenn som fungerar väl över hela frekvensområdet 400 – 800 MHz och att den bör vara liten [30]. Weightless -W använder tidsdelning i kombination med frekvenshopp [31]. Weightless -P erbjuder tvåvägskommunikation och sänder med en bandbredd på 12.5 kHz, vilket är mycket smalbandigt. Weightless -P har en räckvidd på omkring 2 km och till skillnad mot Weightless-N är den därför inte aktuell för WAN-tillämpningar [30]. Weightless -N och -W har en kommunikationsräckvidd på omkring 10 km i tätbebyggda områden, men längre räckvidder kan förekomma. Exempelvis uppges ofta runt 13 km, vilket presenteras i Tabell 5. Weightless har skapat en öppen och global standard, som främst är avsedd att fungera i licensfria frekvensband.

⁴ DBPSK: Modulationsmetoden Differential Binary Phase Shift Keying

⁵ UHF: Ultra High Frequency och är beteckningen för frekvensbandet mellan 300 MHz och 3 GHz.

Tabell 5 Sammanställning av standarder med längre räckvidd (ej inom 3GPP).

	LoRa	Sigfox	Weightless
Kommunikations-avstånd [km]	~15	~13	~13
Frekvensband	Olicensierat, 915 MHz i USA, och 868 MHz i Europa	Olicensierat, 915 MHz i USA, och 868 MHz i Europa	Olicensierat, 915 MHz i USA, och 868 MHz i Europa. -W på TV-band.
Datatakt	~50 kbps	~100 bps	~10 Mbps
Paketstorlek	~243 bytes	~12 bytes	~200 bytes
Proprietär	X	X	X

7.2.2 3GPP

Inom 3GPP, release 13, finns tre nya standarder för IoT-tillämpningar:

- Extended Coverage GSM Internet of Things (EC-GSM-IoT),
- LTE for Machine-Type Communications (LTE-M), och
- Narrowband Internet of Things (NB-IoT).

Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT) är en standardiserad LPWAN-teknik. Den är baserad på eGPRS, även kallad EDGE (EDGE brukar ses som mobiltelefonistandardens 2.5G), och är utformad som ett högkapacitets-, långräckviddigt, lågenergi- och lågkomplexitetssystem för IoT-kommunikation. Batterilivslängden kan vara upp till 10 år. I Tabell 6 sammanfattas några viktiga radioparametrar för några av de trådlösa kandidaterna. EC-GSM-IoT är avsedd att sändas på det licensierade frekvensbandet avsett för GSM (850, 900, 1800 och 1900 MHz) med bandbredden 200 kHz och kan därför ses som relativt smalbandigt [32]. Kommunikationsräckvidden för systemet är omkring 15 km och har en användardatatakt på omkring 10 kbps.

Medan EC-GSM-IoT och LTE är baserade på befintlig radioaccessteknik, är NB-IoT i stor utsträckning en ny radioaccessteknik [33]. Den har en bandbredd på 180 kHz och kan skickas på en LTE-bärare eller på del av skyddsbandet för en

Tabell 6 Sammanställning av IoT-standarder med längre räckvidder inom 3GPP [37].

	LTE Cat M1	NB-IOT	EC-GSM-IoT
Frekvens- användning	I LTE-band	I LTE-band, över LTE guard-band, eller GSM-kanal	I GSM-band
Nedlänk	OFDMA ⁶ , 15 kHz frekvensseparation, turbokod, 16-QAM ⁷	OFDMA, 15 kHz frekvensseparation	TDMA ⁸ /FDMA ⁹ , GMSK ¹⁰ och 8- PSK ¹¹
Uplänk	SC-FDMA ¹² , 15 kHz frekvensseparation, turbokod, 16-QAM	Single-tone, 15 kHz och 3.75 kHz separation, SC- FDMA, 15 kHz frekvensseparation, turbokod	TDMA/FDMA, GMSK och 8-PSK
Bandbredd	1.08 MHz	180 kHz	200 kHz

LTE-signal. Det är även möjligt att skicka den över en GSM-kanal. Därför kan även NB-IOT anses som smalbandig. Enligt [34] ska NB-IOT kunna stödja en minsta kanalbandbredd på 3.75 kHz, vilket ger en stor flexibilitet då systemet ska frekvensallokeras. NB-IOT uppges ha en kommunikationsräckvidd på omkring 22 km och en användardataakt på omkring 150 kbps.

LTE-M är förkortningen för tekniklösningen LTE-MTC¹³ för LPWAN-tillämpningar [35]. LTE-M kan sändas på ett frekvensblock om 1.4 MHz, vilket motsvarar sex stycken LTE-resursblock. LTE-M är mer energisnål än vanlig LTE då den använder så kallad extended discontinuous repetition cycle (eDRX), vilket betyder att en nod kan tala om för nätet hur ofta den vill vakna upp och lyssna på nedlänken. Detta kan ställas som ett tidsintervall på 10 s till 40 minuter. Tekniken ska vara lämplig då lång batteritid (10 år) efterfrågas [36]. Standarden är avsedd för lågkostnadsutrustningar [34]. Enligt [34] har LTE-M en större

⁶ OFDMA: Orthogonal frequency-division multiple access

⁷ 16-QAM: 16- Quadrature amplitude modulation

⁸ TDMA: Time Division Multiple Access

⁹ FDMA: Frequency Division Multiple Access

¹⁰ GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying

¹¹ 8-PSK: 8-Phase Shift Keying

¹² SC-FDMA: Single-Carrier Frequency division multiple access

¹³ MTC: machine type communication

bandbredd och erbjuder en lägre fördröjning och högre datatakt än EC-GSM och NB-IOT, och kan därmed erbjuda tal över IP (VoIP). LTE-M har en kommunikationsräckvidd på omkring 11 km och en användardataakt på 1 MHz. Tekniken ska kunna använda delar av LTE-bandet, 700-900 MHz.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se