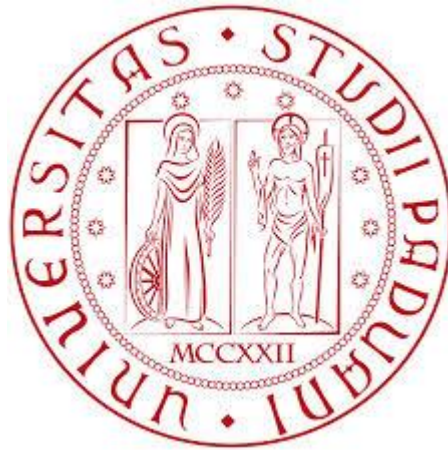


Università degli studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica



Sviluppi e applicazioni dello standard IEEE 802.11ah

Laureando: Corrà Daniele
Matricola: 612586
Relatore: Badia Leonardo
Anno Accademico: 2012-2013

INDICE

I.Introduzione.....	5
II.Caratteristiche di 802.11ah.....	8
<i>Proprietà.....</i>	<i>8</i>
<i>Requisiti per PHY 802.11ah.....</i>	<i>8</i>
<i>Requisiti per MAC 802.11ah.....</i>	<i>10</i>
<i>Differenze con altre tecnologie affini.....</i>	<i>12</i>
III.Casi d'uso in aree rurali.....	13
<i>Smart Grid.....</i>	<i>13</i>
<i>Reti di sorveglianza.....</i>	<i>14</i>
<i>Reti di Smart Farming.....</i>	<i>15</i>
<i>Reti di sensori per parchi nazionali.....</i>	<i>16</i>
<i>Reti di sensori meteorologici.....</i>	<i>16</i>
IV.Progettazione di un sistema 802.11ah.....	17
<i>Raggio di copertura.....</i>	<i>17</i>
<i>Numero di stazioni wireless.....</i>	<i>21</i>
<i>Probabilità d'errore.....</i>	<i>22</i>
<i>Probabilità di interruzione.....</i>	<i>24</i>
V.Conclusioni.....	29
VI.Bibliografia.....	30

I. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è assistito ad un sempre più crescente bisogno di avere accesso alla Rete, non solo tramite i computer (come avveniva appena 10 anni fa), ma anche con qualsiasi dispositivo mobile e non. Pensiamo agli smartphone, ai tablet, alle piattaforme di gioco, alle TV di ultima generazione, ma anche a quei dispositivi che servono da sensori, come i sensori meteo, sensori per Smart Grids, i dispositivi medici, di sicurezza, etc[4].

In questo elaborato ci concentreremo sulle cosiddette WLAN (*Wireless Local Area Network*), cioè di quelle reti di calcolatori a cui ci si può collegare in modalità senza fili, utilizzando una opportuna scheda di rete.

Generalmente le reti WLAN si possono suddividere in due tipologie[1]. Il primo tipo è formato da uno o più client (computer portatili, smartphone, tablet, etc.) e da infrastrutture chiamate AP (*access point*). Tutti gli AP sono connessi ad una rete cablata e tutte le comunicazioni tra client passano attraverso almeno uno di loro. Questa tipologia è chiamata *sistema di distribuzione (distribution system)* ed è tipica delle reti cellulari. Il secondo tipo è formato solamente da client, che comunicano tra loro in un raggio relativamente corto. Questa tipologia è chiamata *rete ad hoc (ad hoc network)*.

Verso la metà degli anni 90, il consorzio IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) diede vita allo standard 802.11, noto anche come Wi-Fi, cioè tutto quell'insieme di regole e linee guida per garantire un corretto funzionamento di trasmissione dati, per le reti LAN senza fili. Il compito fu affidato. Si prestò particolare attenzione al PHY (*Physical Layer*) e al MAC (*Media Access Control*) del modello di rete ISO/OSI (*International Organization for Standardization / Open Systems Interconnection*), specificando sia l'interfaccia tra client e AP, sia tra client wireless[3].

Si decise di utilizzare bande radio senza licenza di frequenza ISM (*Industrial, Scientific, Medical*), definite dall'ITU (*International Telecommunications Union*)[1]. Tra quelle disponibili, si scelsero le frequenze di 2.4 GHz e successivamente di 5 GHz.

Dopo una decina d'anni, sorse un problema che l'IEEE non aveva previsto diventasse di dimensioni così massicce, ovvero l'interferenza con altri dispositivi elettronici[8]: infatti qualunque computer collegato in rete tramite Wi-Fi può benissimo trovarsi in competizione nella banda di frequenza con altri strumenti totalmente differenti, come telefoni cordless, telecomandi per garage, forni a microonde, etc.

L'interferenza tra dispositivi e il congestionamento del traffico wireless si intensificarono e si intensificano tuttora, facendo sorgere la necessità di fare qualcosa per evitare che la banda di frequenza disponibile saturi sotto il peso di tutte le trasmissioni dati.

Una delle possibili soluzioni è costituita dall' IEEE 802.11ah[4][5][6][7][8], un nuovo standard in fase di sviluppo e a basso consumo energetico, che diventerà operativo a tutti gli effetti nel 2016, il cui target è quello creare una WLAN globale che utilizzi bande di frequenza meno congestionate. Lo standard 802.11 utilizza frequenze tipicamente pari a 2.4 GHz (famiglie b/g/n) oppure 5 GHz (famiglie a/n); lo standard 802.11ah invece utilizza frequenze radio minori di 1 GHz. Questo standard è stato pensato in particolar modo per dispositivi di sensoristica, come RFID (*Radio Frequency Identification*), contatori, sensori,

stazioni meteo, cioè quei dispositivi che non hanno bisogno di banda larga, ma piuttosto di un lungo raggio di comunicazione perché spesso impiegati in luoghi poco agibili o poco abitati: dato che oggi utilizzano lo standard 802.11 g/n (cioè con frequenze di 2.4 GHz), spostando la loro frequenza sotto 1 GHz, il congestionamento globale del Wi-Fi si potrebbe ridurre di una buona percentuale. Tra l'altro, operando in frequenze così basse, il consumo energetico dei dispositivi sarà minore rispetto al consumo del Wi-Fi tradizionale.

Tuttavia, il motivo principale della creazione dello standard 802.11ah è stato l'avvento delle Smart Grids, che potrebbero, a breve, invadere pesantemente i mercati [4][6][8]. Ma che cosa sono le Smart Grids e quali legami hanno con il nuovo standard?

Il termine inglese Smart Grid viene tradotto letteralmente in italiano "Rete elettrica intelligente". Una Smart Grid è una rete informatica che gestisce principalmente la rete di distribuzione elettrica di case o aziende: in questo modo si possono evitare sprechi energetici, cadute di tensione o sovraccarichi e si possono convogliare eventuali surplus di energia in altre aree. Il tutto viene organizzato attraverso un sistema estremamente ottimizzato per il trasporto e diffusione dell'energia elettrica. In aggiunta, si possono ottenere informazioni costanti anche sull'utilizzo di gas, acqua, etc. tramite i contatori.

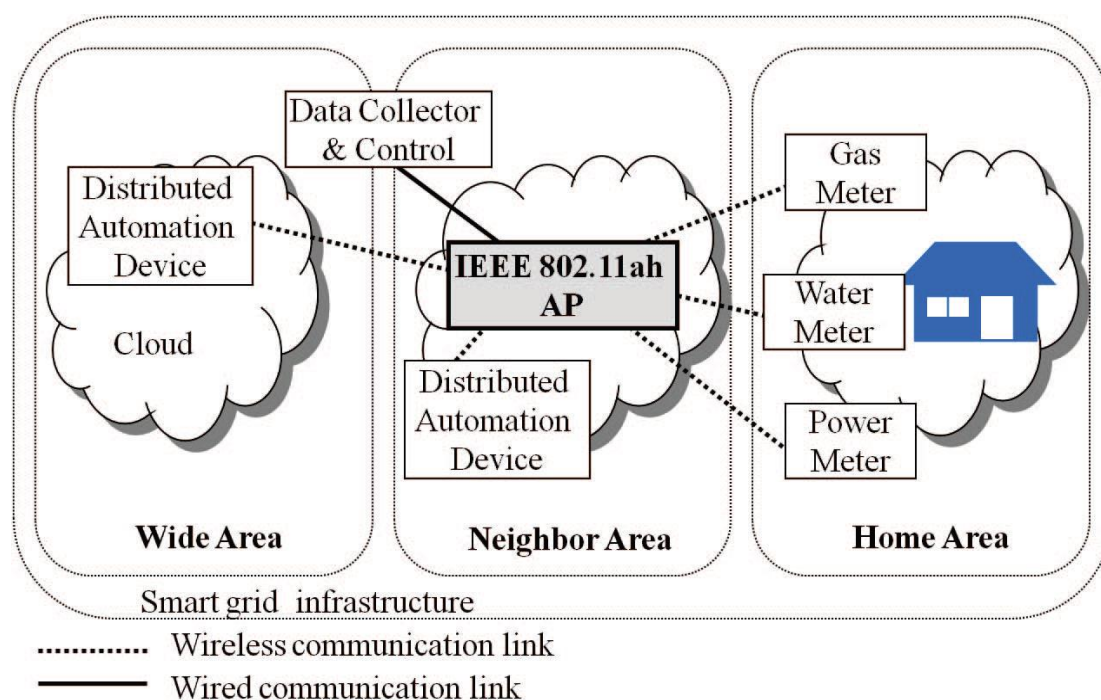


Figura 1: schema di Smart Grid

Dato che la salvaguardia dell'energia è un argomento molto delicato e molto importante, è importante sottolineare che dalle Smart Grids si possa trarne beneficio non solo a livello privato, ma anche pubblico.

A richiedere uno standard Wi-Fi nuovo che avesse delle caratteristiche ottimali per questo tipo di applicazione, quali utilizzo di frequenze minori e coperture wireless più ampie, è stata

proprio la comunità delle Smart Grids (in pratica realizzatori e utilizzatori)[6]. Un sistema Smart Grid ideale prevede infatti una serie di "client", cioè centraline di controllo contatori, collegate a uno o più AP, in ampie aree urbane e non: l'insieme di tutti gli AP costituisce il sistema Smart Grid globale.

Nel prossimo capitolo si vedranno le proprietà principali del nuovo standard, i requisiti di progettazione per i livelli PHY e MAC del modello ISO-OSI e le differenze con altre tecnologie affini (come Bluetooth[5] o ZigBee[5]).

Nel capitolo III si comprenderanno meglio i possibili casi d'uso, in particolare in aree rurali.

Nel capitolo IV si analizzeranno le prestazioni che comporterà il nuovo standard, con relative formule e risultati numerici, per ciò che riguarda il raggio di copertura AP, le STAs sotto copertura da ogni AP, la probabilità d'errore e la probabilità di interruzione.

Infine nel capitolo V si trarranno le conclusioni riassuntive delle proprietà dello standard e delle applicazioni future.

II. CARATTERISTICHE DI 802.11ah

In questo capitolo si entrerà più in dettaglio nello standard 802.11ah. Si analizzeranno in particolare le proprietà dello standard, i requisiti di progettazione per i livelli fisico e MAC del modello ISO-OSI e si andranno a chiarire le differenze con altre tecnologie o standard affini. Da notare fin da subito che lo standard preso in esame è ancora ampiamente in fase di sviluppo, per cui le caratteristiche tecniche più avanzate non verranno trattate proprio perché non disponibili. Altri dati tecnici importanti tendono infatti a essere divulgati solo al lancio sul mercato, previsto per il 2016.

II.A Proprietà

Il futuro standard IEEE 802.11ah presenta diverse interessanti proprietà, alcune delle quali molto diverse da quelle dello standard padre 802.11[3]:

- Utilizzo di frequenze inferiori a 1 GHz prive di licenza;
- Velocità di trasmissione dati fino a 100 kbps;
- Dimensione dei pacchetti pari a 256 Byte;
- Possibilità di integrazione in sistemi 802.11 già esistenti;
- Potenza del trasmettitore massima di 10-100 mW (ma con eccezioni che arrivano fino a 1 W massimo a seconda delle normative di governo dei vari Paesi);
- Raggio di copertura di un singolo Access Point pari a 1 km massimo;
- Alta densità di copertura di Stazioni Wireless per ogni Access Point.

II.B Requisiti per PHY 802.11ah

In questo paragrafo si descriveranno i requisiti di progettazione del livello fisico (chiamato per comodità PHY) relativo al modello OSI. Nella gerarchia di livelli ISO-OSI, il PHY è il livello più basso, che ha il compito in sostanza di definire gli aspetti elettrici, di temporizzazione e altre modalità con cui i bit, sotto forma di segnali elettromagnetici, vengono spediti sui canali di comunicazione. Per lo standard IEEE 802.11ah le questioni fondamentali sono rappresentate dalla modulazione, dalla potenza di trasmissione e dallo spettro di frequenze utilizzate.

Il futuro standard IEEE 802.11ah prevederà l'utilizzo della tecnica MIMO-OFDM (*Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) a bande ISM inferiori a 1 GHz[4]. La modulazione OFDM divide la banda del canale in molte sottoportanti che inviano dati in maniera indipendente le une dalle altre; la risposta in frequenza di ogni sottoportante è progettata in maniera tale da essere 0 in corrispondenza del centro delle sottoportanti a essa adiacenti e può quindi essere campionata nella frequenza centrale senza interferenza da parte dei vicini. Ogni sottoportante viene a sua volta modulata attraverso la tecnica *BPSK* (*Binary Phase-Shift Keying*): i valori 0 e 1 dei bit vengono associati a due fasi differenti della costellazione (generalmente 0° e 180°), da cui si possono dedurre i segnali modulati. La tecnica MIMO invece, offre miglioramenti riguardo alla distanza di

trasmissione e soprattutto una migliore efficienza spettrale, ovvero più bit al secondo per ogni hertz di banda [8].

Un altro aspetto legato al PHY riguarda la potenza trasmessa dalle antenne. Si è soliti parlare di EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*)[3], che rappresenta una misura di irradiazione di potenza radio di una antenna isotropa ideale, misura che è indipendente dalla larghezza di banda utilizzata: detta in parole povere, è un calcolo dell'effettiva potenza di trasmissione di un sistema radio. Una antenna isotropa è un'astrazione per rappresentare una antenna che irradia potenza in tutte le direzioni in modo uniforme.

Il tasso di EIRP viene impostato con un decreto legge da ogni governo, come succede per le frequenze di utilizzo. I possibili valori variano tra 0, 10, 20 e 30 dBm, ovvero 1, 10, 100 e 1000 mW. La maggior parte dei Paesi che adotteranno la tecnologia 802.11ah hanno impostato il limite sui 10 mW salvo eccezioni, come ad esempio alcuni stati degli Stati Uniti (Arizona, New Mexico e Colorado[10]) che accetteranno fino a 1 W di potenza emessa. Interessante notare che lo standard padre 802.11 di norma arriva ad un massimo di 20 dBm di potenza, ovvero 100 mW[3].

Invece le stazioni wireless (cioè i dispositivi di misura e sensori) generalmente hanno una potenza di 0 dBm (ossia 1 mW)[5] e ciò permette loro di avere un consumo di batteria molto ridotto.

Per quanto concerne lo spettro di frequenze utilizzate invece, il futuro standard IEEE 802.11ah adotterà frequenze minori di 1 GHz, in particolar modo le frequenze inferiori della banda chiamata UHF (*Ultra High Frequency*)[4], la quale occupa un intervallo dello spettro a partire da 3 MHz fino a 3 GHz. Sono frequenze utilizzate da diversi servizi: canali televisivi, telefonia cellulare, comunicazioni aeronautiche militari, forni a microonde domestici e, naturalmente, reti wireless.

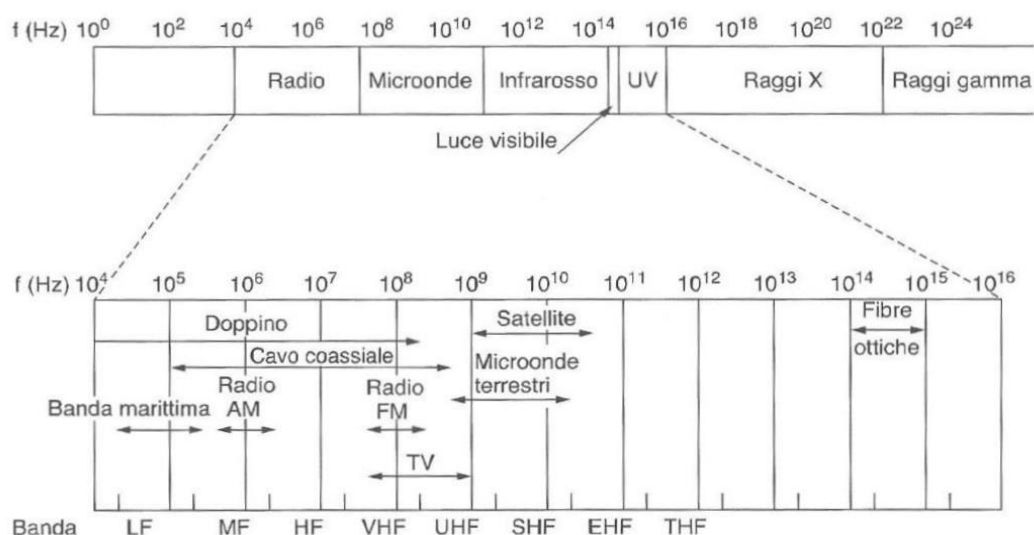


figura 2: spettro di frequenze[1]

Si dovrà capire fin da subito se i vari governi siano disponibili a garantire la possibilità di utilizzo delle bande inferiori a 1 GHz. Potrebbe darsi che alcuni di essi non lascino il via libera, o per un sovraccarico di tali frequenze o per motivi politico/burocratici[4]. Qui di seguito si andrà a verificare la situazione in alcune nazioni del mondo:

- In Europa (Russia compresa), la frequenza portante partirà da 863 MHz e arriverà a 868 MHz. Saranno disponibili 5 canali con 1 MHz di banda e 2 canali con 2 MHz;
- In Cina, la frequenza portante potrà avere diversi intervalli: 314-316 MHz, 430-434 MHz, 470-510 MHz, 779-787 MHz. Da notare che gli intervalli 470-562 MHz e 606-958 MHz in Cina sono parecchio congestionati, perché utilizzati dai canali TV [7]. Sono stati approvati 4 canali con 2 MHz, 2 canali con 4 e 1 canale con 8 MHz;
- In Corea del Sud, la frequenza portante partirà da 917.5 MHz e arriverà a 923,5 MHz. Saranno impiegati 6 canali con larghezza di banda di 1 MHz, 3 canali a 2 MHz e 1 canale a 4 MHz;
- A Singapore, la frequenza portante partirà da 920 MHz e arriverà a 925 MHz. Saranno utilizzati 5 canali con larghezza di banda di 1 MHz;
- In Giappone, la frequenza portante partirà da 916.5 MHz e arriverà a 927.5 MHz. La suddivisione dei canali è in fase di conflitto, perché nel territorio sono già presenti altri standard che operano in basse frequenze e che potrebbero interferire drasticamente, come ad esempio lo standard IEEE 802.15.4d [7];
- In Australia, la frequenza portante partirà da 915 MHz e arriverà a 928 MHz. E' ancora in fase di studio la quantità e la larghezza dei canali;
- In Nuova Zelanda, la frequenza portante partirà da 863 MHz fino a 870 MHz. Anche qui la quantità e la larghezza dei canali sono in fase di decisione;
- Negli Stati Uniti l'assegnazione dei canali a basse frequenze non è ancora avvenuta. Ciò è dovuto al fatto che la normativa negli USA permette fino a 16 MHz di banda tra 902 MHz e 928 MHz e la larghezza di banda proposta per i canali, sarebbe di 1, 2, 4, 8, e 16 MHz.

II.C Requisiti per MAC 802.11ah

In questo paragrafo invece, si descriveranno i requisiti di progettazione del sottolivello MAC relativo al modello OSI. Il MAC (*Media Access Control*) è un sottolivello inferiore del livello due del modello OSI (chiamato *livello data link*), che si occupa dell'allocazione del canale di comunicazione ad accesso multiplo: accesso multiplo significa che potenzialmente ci possono essere più "entità" in competizione tra loro per l'utilizzo del canale disponibile[1]. Nel caso dello standard IEEE 802.11ah, il canale, come visto nel precedente paragrafo, è lo spettro di frequenze inferiori a 1 GHz.

Il problema principale che il sottolivello MAC è obbligato a risolvere è la gestione delle collisioni di pacchetti. Una collisione è un evento che si verifica quando due frame trasmessi simultaneamente si sovrappongono, causando nel canale un picco di rumore rilevabile da tutte le stazioni in ascolto e creando un nuovo frame incomprensibile. Se un frame subisce una collisione, dovrà essere ritrasmesso in seguito: ciò comporta non solo uno spreco di banda, ma anche un ritardo, talvolta significativo, in ricezione. Tuttavia, in presenza di

collisioni, le altre stazioni in ascolto quantomeno capiscono che il canale è temporaneamente occupato.

Come tutte le famiglie di protocolli IEEE 802.11 (e come la tecnologia ZigBee tra l'altro), anche lo standard 802.11ah utilizza il protocollo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) per evitare le collisioni nel canale di trasmissione [3][4]. Si tratta di un protocollo con rilevamento della portante (ossia di una trasmissione), non molto dissimile da quello utilizzato in Ethernet (CSMA/CD). Analizziamone il funzionamento [1].

A meno che non abbia utilizzato il canale di recente o quest'ultimo sia libero, una stazione wireless con un frame da spedire calcola un intervallo di tempo casuale (chiamato *backoff*) e non aspetta che avvenga una collisione per sapere se il canale è occupato. Se avviene una collisione, il tempo viene diviso in intervalli discreti la cui lunghezza è uguale al tempo di propagazione di andata e ritorno, nel caso peggiore, di un pacchetto sul mezzo di trasmissione. Il numero di slot di backoff è scelto nell'intervallo tra 0 e 15 nel caso di modulazioni OFDM. La stazione attende fino a che il canale non si liberi, rilevando che non c'è segnale per un certo periodo di tempo e conta alla rovescia gli slot inattivi. La stazione spedisce il suo frame quando il contatore arriva a 0. Se il frame arriva a destinazione, il destinatario spedisce un frame di acknowledgement immediatamente, la mancanza del quale potrebbe essere indice di collisione. In questo caso il mittente raddoppia il periodo di backoff e prova ancora finché il frame non sia stato trasmesso con successo o non sia stato raggiunto il numero massimo di ritrasmissioni. Questo modo di operare è chiamato DCF (*Distributed Coordination Function*) perché ogni STA agisce indipendentemente dalle altre, senza nessun controllo centrale [4].

Facciamo un esempio pratico, per capirne i meccanismi. Siano A, B e C tre stazioni wireless che comunicano con un'altra stazione D che potrebbe essere l'Access Point in un sistema wireless.

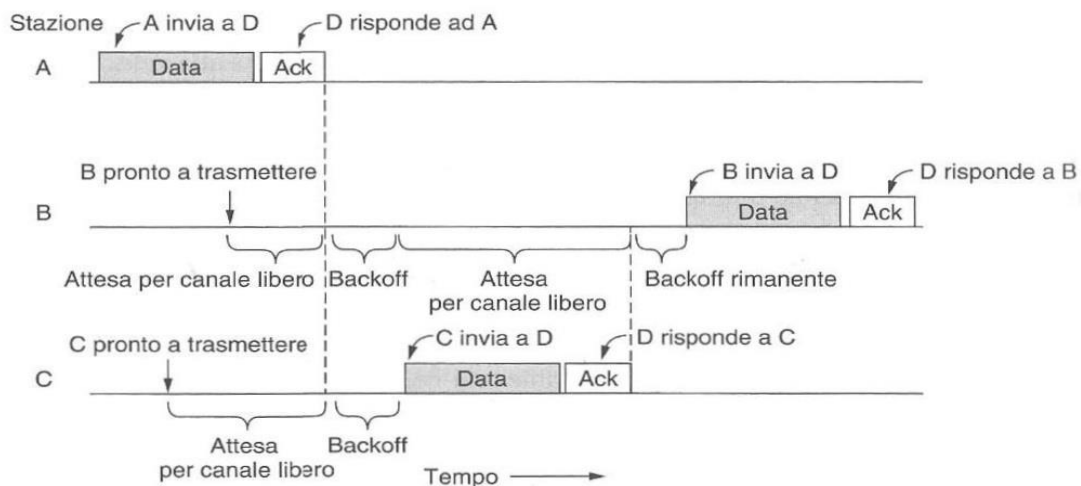


Figura 3: invio del segnale[1]

La stazione A è la prima a spedire un frame. Mentre A spedisce, B e C diventano pronte per spedire, ma il canale è occupato e attendono che si liberi. Poco dopo che A riceve

l'acknowledgement da D, il canale diventa libero. Tuttavia, invece di spedire un frame e farlo collidere, entrambe B e C eseguono un backoff casuale. C sceglie un backoff breve e spedisce per primo rispetto a B. B mette in pausa il conto alla rovescia quando rileva che C sta utilizzando il canale e ricomincia quando C riceve un acknowledgement. Infine, B completa il suo backoff e spedisce il frame. L'obiettivo di *Collision Avoidance* si ottiene dunque per via statistica proprio grazie all'estrazione del numero casuale, data la scarsa probabilità che due o più stazioni estraggano lo stesso numero di back-off.

In aggiunta alla CSMA/CA viene utilizzata anche la tecnica RTS/CTS (di prenotazione del canale) per affrontare il problema del cosiddetto *terminale nascosto*[1], ovvero il fatto che una stazione A che trasmette verso una stazione B può non essere in grado di rivelare una stazione C anch'essa impegnata in una comunicazione con B, generando così collisioni in ricezione su B: la stazione wireless invierà un pacchetto RTS (*request to send*) all'AP, il quale risponderà in broadcast con un messaggio di CTS (*clear to send*) se non sta trasmettendo ad un'altra stazione nascosta[1].

II.D Differenze con altre tecnologie affini

Ci sono altre tecnologie a basso consumo energetico che apparentemente potrebbero sembrare simili allo standard IEEE 802.11ah (per questo potremmo chiamarle affini): in realtà esistono numerose differenze tra l'una e l'altra [5]. Analizziamole in dettaglio.

- **ZigBee.** La tecnologia più simile allo standard 802.11ah è certamente ZigBee[18], che può essere definita come una specifica per un insieme di protocolli di comunicazione basata sull' IEEE 802.15.4, studiata apposta per reti WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Le sue caratteristiche principali sono:
 - utilizzo di frequenze ISM di 868 e 915 MHz, ma anche di superiori (pari a 2.4 GHz);
 - potenza massima trasmessa di 0 dBm (1 mW);
 - raggio di copertura wireless molto limitato (da 10 a 100 m massimi);
 - modulazione BPSK per le frequenze inferiori a 1 GHz;
 - bit rate di 40 kbps per canale nella banda a 915 MHz e 20 kbps nella banda a 868 MHz.
- **Bluetooth.** Un'altra tecnologia simile allo standard 802.11ah è il Bluetooth[19] che può essere definito come uno standard tecnico-industriale di trasmissione dati, ideato appositamente per WPAN dalla Ericsson e poi perfezionato anche da IBM, Intel, Nokia e Toshiba. Le sue caratteristiche principali sono:
 - utilizzo di frequenze ISM di 2.4 GHz;
 - potenza massima trasmessa di 20 dBm (100 mW) per i dispositivi con raggio di copertura più ampio, 0 dBm (1 mW) per quelli con raggio più ristretto;
 - raggio di copertura tra 1 e 10 m per il Bluetooth classico, fino a 100 m per quello di ultima generazione;
 - modulazione TDM (*Time Division Multiplexing*);
 - bit rate di 700 kbps per versioni Bluetooth 1.0, fino a 3Mbps per 2.0.

III. CASI D'USO IN AREE RURALI

Lo standard 802.11ah è stato ideato in particolare per avere una grossa copertura wireless. Quindi uno degli scenari migliori per poterlo utilizzare è costituito dagli ambienti rurali, scarsamente abitati, dove tutte le informazioni relative ai sensori o contatori possono essere difficili da reperire altrimenti. Naturalmente, ciò non toglie che lo si possa adoperare anche in ambienti urbani, ma in tali ambienti di norma le stazioni AP sono molto diffuse e quindi il raggio di copertura wireless non costituisce un problema. In questo capitolo si andranno ad analizzare alcuni possibili casi d'uso in ambiente rurale, tra cui le Smart Grids, reti di sorveglianza e reti di Smart Farming [4][8].

III.A Smart Grid

Nel prossimo futuro si comincerà ad equipaggiare le infrastrutture di rete di alimentazione con sensori addizionali e dispositivi di misura[6]. L'obiettivo è quello di rendere l'intera rete elettrica più "verde", informando aziende e utenti finali privati del loro utilizzo di energia, in modo da, ad esempio, ridurre i picchi di consumo che potrebbe portare altrimenti a frequenze operative instabili nell'intera linea di alimentazione o gestire meglio i consumi di gas o acqua. Dapprima si inizierà a livello di reti locali, poi si passerà pian piano a reti provinciali, regionali, nazionali e internazionali. Reti di questo genere sono le Smart Grid, ed è il primo esempio di caso d'uso che andremo ad analizzare.

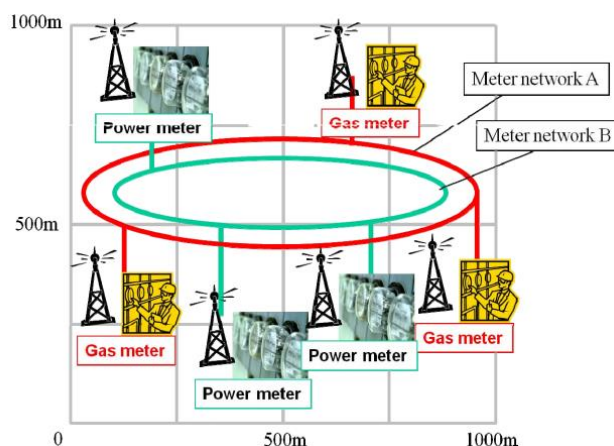


Fig. 4: Reti di Smart Grid in aree rurali

Come detto in precedenza, le Smart Grids hanno avuto un ruolo dominante nella creazione dello standard IEEE 802.11ah. Tendenzialmente, si è pensato di costruire chip basati sullo standard IEEE 802.11ah appunto, da applicare a sensori e contatori già esistenti, e installare varie stazioni AP laddove non ve ne fossero (per questo è di particolare interesse il caso di aree rurali, proprio perché scarsamente equipaggiate). L'altezza dell'antenna AP può variare tra 5 e 15 metri[6].

Dato che lo standard 802.11ah prevede un raggio di copertura fino a 1 km, è evidente che esso stesso sia perfetto per reti di Smart Grid situate ad esempio in campagna o in montagna, dove normalmente sono presenti poche case e aziende. La figura 4 mostra un ipotetico scenario di Smart Grid costituita da contatori di gas e di alimentazione elettrica in un' area rurale con due reti wireless ortogonali.

III.B Reti di sorveglianza

Il secondo esempio di caso d'uso in aree rurali sono le reti di sorveglianza[8]. Spesso aziende o abitazioni che si trovano in zone appartate o isolate, hanno la necessità di avere un buon sistema d'allarme che non si limiti semplicemente a far scattare un segnalatore acustico, ma che sia anche in grado di collegarsi in qualche modo con la stazione di polizia più vicina o comunque con un qualsiasi ente per la sicurezza o sorveglianza. Anche qui lo standard 802.11ah si dimostra perfetto per queste situazioni.

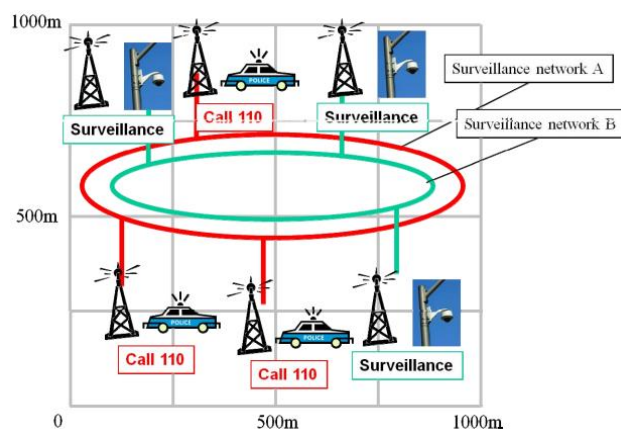


Fig. 5: Reti di sorveglianza in aree rurali

I dispositivi d'allarme possono essere di vario genere: sirene, sensori di rilevamento, sensori termici, sensori laser, etc. Anche in questo caso, basterà applicare loro un chip basato su 802.11ah e installare una antenna AP in un intorno con raggio massimo di 1 km. L'antenna AP potrà essere alta da 5 a 15 metri. La figura 5 mostra un ipotetico scenario di reti di sorveglianza in aree rurali con due reti wireless ortogonali, una creata apposta per segnalare l'allarme direttamente alla polizia, l'altra per gestire le telecamere di sicurezza.

Sistemi più sofisticati adottano anche telecamere. Si potranno inviare dati video in tempo reale agli organi competenti, anche se il bit rate dello standard IEEE 802.11ah non è molto elevato. Se si volesse essere certi che i dati vengano ricevuti in un tempo quasi immediato, allora si dovrà applicare alle telecamere un chip basato su 802.11b/n/g, ma ciò comporta, naturalmente, l'installazione di molte più stazioni AP wireless.

III.C Reti di Smart Farming

Un'altra tecnologia recente, introdotta apposta per il settore primario, è la Smart Farming, ossia "allevamento intelligente"[8]: si tratta in pratica di una rete che raccoglie informazioni e dati in tempo reale ad esempio sulle condizioni del terreno, delle colture e del bestiame. Il dispiegamento di sensori per rilevare variazioni di temperatura o malattie nel bestiame sta diventando una questione importante per gli agricoltori e allevatori, perché possibili complicazioni quali inondazioni, principi di incendi o infezioni possono essere devastanti per le aziende agricole.

Il terzo esempio di caso d'uso tratta questo aspetto. In futuro, le reti di Smart Farming diverranno fondamentali per le aziende agricole e ancora una volta lo standard IEEE 802.11ah la fa da protagonista. I sensori per tali reti possono essere molteplici: per quanto riguarda l'agricoltura possono esserci sensori di analisi del terreno, di condizioni di temperatura all'interno di serre o anche all'esterno, di quantità d'acqua utilizzata o presente nel terreno, di rilevamento di microbi o insetti nocivi alle colture, etc. Per quanto riguarda l'allevamento possono esserci sensori di rilevamento di quantità di mangime/cibo o acqua per ogni singola postazione di bestiame o nei silos (o in altri depositi), di condizioni di salute del bestiame, fino ad arrivare ai contatori del livello del latte nelle mungitrici, ad esempio.

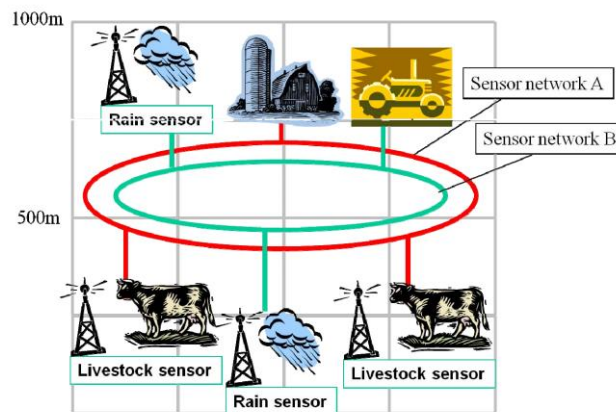


Fig. 6: Rete di Smart Farming in aree rurali

Anche in questo caso basta installare questi dispositivi, o applicare un chip basato sullo standard 802.11ah a quelli già esistenti e installare una o più antenne AP a seconda delle dimensioni in km dell'azienda. L'altezza dell'antenna AP può essere alta da 5 a 15 metri. La figura mostra un ipotetico scenario di rete di Smart Farming in un'area rurale avente due reti wireless ortogonali, una per le condizioni del bestiame e una per le condizioni del terreno e del clima. La figura 6 ne mostra un esempio semplificato.

Aziende agricole all'avanguardia, utilizzano dispositivi di rintracciamento RFID[8] per gli animali (non da carne), che generalmente vengono applicati sugli animali stessi[1]. Questi minuscoli dispositivi possono contenere qualche byte di informazioni (ad esempio i dati anagrafici dell'animale) ma soprattutto rintracciano la posizione dell'animale. Questo aspetto serve agli allevatori qualora si porti il bestiame al pascolo, avendo così la garanzia che

nessun esemplare si smarrisca. Questa curiosità trova fondamentale importanza nel prossimo caso d'uso.

III.D Reti di sensori per parchi nazionali

Un altro interessante aspetto di utilizzo dello standard IEEE 802.11ah, che costituisce il quarto esempio di caso d'uso, è quello relativo alle reti di sensori per parchi nazionali[4], in particolar modo per il rintracciamento degli animali.

Come detto in precedenza, i dispositivi RFID possono venire applicati sugli animali stessi in modo da conservare dati anagrafici, eventuali trattamenti subiti, etc., oltre a fornire indicazioni sulla posizione geografica istantanea. Questi chip operano in frequenze relativamente molto basse e soprattutto del tutto innocue per l'animale. Risulta evidente che un parco nazionale che riesca ad ottenere tutte queste informazioni per ogni tipo di animale possa avere enormi vantaggi[4].

In questo modo, le guardie forestali dei parchi (o comunque qualsiasi organo dedito alla salvaguardia dello stesso) non dovranno più andare nel parco di persona con apparecchiature di rintracciamento spesso ingombranti e poco maneggevoli, bensì potranno avere qualunque informazione in qualunque momento direttamente dalla "stazione di controllo del parco", previa installazione di una o più antenne AP a seconda dell'area del parco. Le antenne AP in questo caso saranno alte 15 metri. Il controllo demografico, tra l'altro, potrebbe essere una buona arma contro eventuali bracconieri o cacciatori di frodo.

Naturalmente, i dispositivi di rintracciamento possono essere estremamente preziosi nel campo della ricerca naturalistica: naturalisti, biologi, o anche semplicemente appassionati, potranno infatti avere informazione sugli spostamenti, sulle tecniche di caccia, sulla vita sociale, etc. di ogni specie animale presente nel parco.

III.E Reti di sensori meteorologici

Come ultimo esempio di caso d'uso, si andrà ad analizzare la possibilità di creare una infrastruttura basata sullo standard 802.11ah per reti di sensori meteo in aree rurali[4].

In montagna in particolare, dove il clima può cambiare da un momento all'altro, si potrebbero installare, in vari punti strategici, alcuni sensori meteorologici (e alcune stazioni AP) in grado di rilevare sbalzi di temperatura, pioggia, neve, etc. Queste informazioni, acquisibili in tempo reale, potrebbero essere fondamentali per organi di sicurezza quali soccorso alpino o guardia forestale, ma anche per gestori di rifugi in alta quota, impianti sciistici, scalatori, etc.

Naturalmente, sensori meteo possono benissimo essere installati anche in pianura e in città, o anche lungo le spiagge.

IV. PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA 802.11ah

In questo paragrafo si andranno ad analizzare i risultati teorici e sperimentali relativi ad un sistema wireless 802.11ah. Si apprenderanno meglio i concetti già accennati relativi a densità di stazioni wireless, raggio di copertura e area di copertura, e si introdurranno i nuovi concetti di rumore, link budget, guadagni di potenza di trasmissione/ricezione, probabilità d'errore, multipath fading, path loss e probabilità d'interruzione.

Sottolineiamo fin da subito che i risultati numerici seguenti e i grafici ed essi connessi sono stati sperimentati e calcolati negli Stati Uniti (dove d'altronde si sta costruendo lo standard con maggior spinta) e di conseguenza alcuni dati potranno essere anche decisamente diversi da quelli relativi a Europa o Asia.

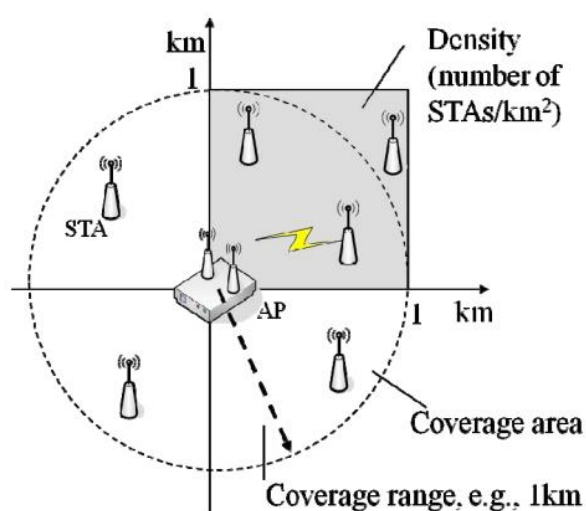


Figura 7: densità, raggio e area di copertura

IV.A Raggio di copertura

Uno strumento che nella teoria delle comunicazioni gioca un ruolo fondamentale è di certo il rapporto segnale-rumore (abbreviato *SNR*), cioè appunto il rapporto matematico tra la potenza del segnale utile ricevuto e il rumore presente nel sistema considerato.

Per quanto ci si sforzi di progettare sistemi di comunicazione sempre più affidabili e innovativi, ci si dovrà adattare al fatto che il rumore sarà sempre e comunque presente. Per rumore si intende un qualsiasi fattore esterno al sistema in grado di corrompere e modificare il segnale utile. Il più frequente è sicuramente il rumore termico, generato da un resistore: basti pensare che se il trasmettitore e il ricevitore funzionano a corrente elettrica, come la stragrande maggioranza di dispositivi, i circuiti di entrambe le apparecchiature si scaldano (o peggio surriscaldano) e solo questo basta a creare piccoli disturbi[2].

Il rumore può essere descritto dalla seguente equazione:

$$N = N_0 B = k_b T_0 B \quad (1)$$

dove:

- k_b è la costante di Boltzmann ($1.3806488 \times 10^{-23}$ J/K);
- T_0 è la temperatura dell'ambiente misurata in gradi Kelvin (293 K a temperatura ambiente);
- B è la ampiezza di banda espressa in Hz.

Tanto maggiore è la potenza del rumore rispetto a quella del segnale utile, tanto minore sarà la qualità della comunicazione[5]. Infatti, l' SNR di fatto quantifica questa "qualità", in modo rigoroso e sintetico.

Per calcolare il raggio di copertura massimo, in realtà abbiamo bisogno di un "parente stretto" dell'SNR, chiamato *link budget*. Il link budget è una stima iniziale della qualità del sistema ed è principalmente utilizzato per regolare la potenza del trasmettitore; tuttavia non tiene conto dei disturbi che possono danneggiare il segnale[8]. Come per l'SNR, anche qui si cerca di massimizzarne il valore (generalmente da 100 dB in su). Di seguito, viene riportato il calcolo del link budget espresso in dB, tramite l'equazione 2:

$$L_B = P_{tx} + J_g - (P_l - 10 \log_{10} h_a + 10 \log_{10} D_r + N) \quad (2)$$

dove:

- L_B è il link budget espresso in dB;
- P_{tx} è la potenza trasmessa espressa in dBm;
- J_g è il guadagno di antenna espresso in dB (3 dB);
- P_l è un parametro che rappresenta l'insieme dei fattori di attenuazione, tra cui la *perdita di implementazione* (specifico del venditore) e altri fenomeni, espresso in dB (valore approssimabile a 23 dB);
- h_a è l'altezza dell'antenna espressa in metri (5, 10, 15 m);
- D_r è il bit-rate espresso in bps (100000 bps);
- N è il rumore del sistema espresso in dB.

Trovato il valore di link budget, ora siamo in grado di calcolare il raggio di copertura massimo di un AP[8] tramite l'equazione seguente:

$$C_r = 10^{\left(\frac{L_B - G_{tx} - P_s}{G_{rx}}\right)/10} \quad (3)$$

dove:

- C_r è il raggio di copertura massimo espresso in metri;
- L_B è il link budget calcolato con l'equazione (2);
- G_{tx} è il guadagno di potenza del trasmettitore espresso in dB (3 dB);

- P_s è un parametro specifico dell'ambiente espresso in dB detto *effetto shadowing* (generalmente 8 dB)[8];
- G_{rx} è il guadagno di potenza del ricevitore espresso in dB (3 dB).

Analizzando l'equazione (3), si trova che il raggio di copertura massimo, a parte i valori di attenuazione, è funzione di una serie di parametri molto importanti, quali l'altezza dell'antenna di AP, il bit rate, la potenza di trasmissione e anche la frequenza di utilizzo[2]. Infatti, entrambi i guadagni di potenza del trasmettitore e del ricevitore G_{tx} e G_{rx} sono direttamente proporzionali alla frequenza adoperata, legge che riportiamo come equazione 4:

$$G = \frac{4\pi f^2}{c^2} A_{eff} \quad (4)$$

dove:

- G è il guadagno di potenza con quantità adimensionale;
- f è la frequenza di utilizzo espressa in Hz;
- c è la velocità della luce espressa in m/s (3×10^8 m/s);
- A_{eff} è l'area della Superficie Equivalente Elettromagnetica espressa in m^2 che dipende dal diametro dell'antenna e dalla sua efficienza.

Per sistemi 802.11ah che utilizzano frequenze di 900 MHz i guadagni hanno valore 3 dB come scritto sopra, mentre per sistemi wireless 802.11 tradizionali con frequenze di 2.4 GHz i guadagni hanno valori più alti (circa 5 dB).

A questo punto ci si potrebbe chiedere come AP e STA aventi potenze di trasmissione decisamente differenti possano coprire la stessa distanza massima (1000 m) di trasmissione dati[5]. Analizziamo i due casi:

- **Caso Downlink.** Il caso *downlink* per sistemi wireless corrisponde al caso in cui il trasmettitore (Access Point) manda il segnale e il ricevitore (Stazione Wireless) lo riceve. Come spiegato in precedenza, la potenza massima di un AP è di 20 dBm (100 mW); l'altezza massima di antenna è di 15 m; la grandezza di banda nel caso downlink è di 2 MHz: sostituendo tale valore nell'equazione (1) relativa al rumore e convertendo il risultato in dB, si ottiene -140. Sostituendo questi valori, più quelli "standard" nell'equazione (2), si ottiene un valore di link budget di circa 100 dB che a sua volta va sostituito nell'equazione (3). Si ottiene così un raggio massimo di copertura pari a 1000 metri circa.
- **Caso Uplink.** Il caso *uplink* per sistemi wireless invece corrisponde al caso in cui il trasmettitore (Access Point) riceve il segnale inviato dal ricevitore (Stazione Wireless). La potenza massima di una STA è di 0 dBm (1 mW); l'altezza massima di antenna nel caso uplink è del tutto irrilevante e viene tralasciata nel calcolo del link budget; ciò che cambia rispetto al caso downlink, è la grandezza di banda che generalmente è pari a 2 KHz, notevolmente meno rispetto a prima: sostituendo tale valore nell'equazione (1) relativa al rumore e convertendo il risultato in dB, si ottiene -170. Sostituendo questi valori, più quelli "standard" nell'equazione (2), si ottiene

ancora una volta un valore di link budget di circa 100 dB che a sua volta va sostituito nell'equazione (3). Si ottiene così un raggio massimo di copertura pari a 1000 metri circa, esattamente come nel caso downlink. Il fatto di giocare d'astuzia con le grandezze di banda in downlink e uplink è ormai prassi non solo per tutte le trasmissioni wireless, ma anche per trasmissioni cellulari e satellitari[2].

Ci soffermiamo ora ad analizzare alcuni risultati grafici relativi al caso *downlink* tra due trasmissioni wireless, al variare dell'altezza di AP, tenendo costanti tutti gli altri valori: la curva "+" corrisponde ad un sistema wireless 802.11ah (900 MHz), mentre la curva "□" rappresenta un sistema wireless 802.11 classico (2.4 GHz).

- **Antenna a 15 metri.** La figura 8 mostra una stima del raggio di copertura di un AP 802.11ah, rispetto ad uno 802.11 classico avendo supposto l'altezza dell'antenna AP per entrambi i sistemi di 15 metri. Si noti che la copertura a 900 MHz è quasi doppia rispetto a 2.4 GHz. Interessante notare che per arrivare a 1000 metri di raggio di copertura, sistemi 802.11 classici necessitano di potenze superiori a 1000 mW a scapito di appena 100 mW per sistemi 802.11ah[8].

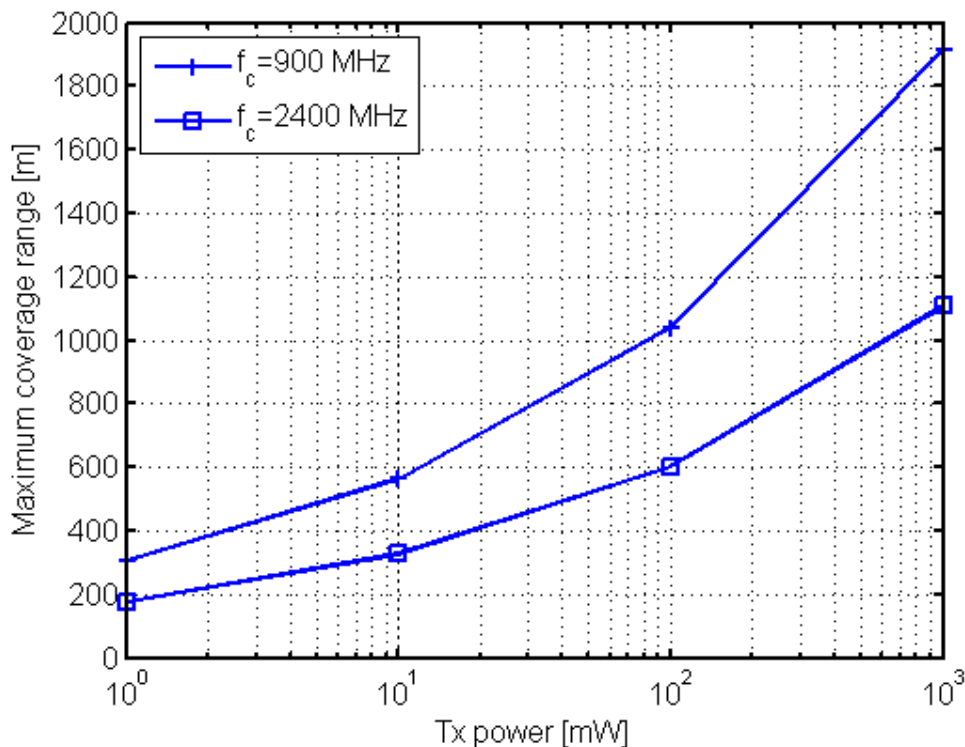


Figura 8: raggio massimo di copertura (15 m di altezza)[8]

- **Antenna a 5 metri.** La figura 9 invece, mostra una stima del raggio di copertura di un AP 802.11ah, rispetto ad uno 802.11 classico avendo supposto l'altezza dell'antenna AP per entrambi i sistemi di 5 metri. Si osservi che in fig. 9 il raggio di copertura massimo è stato ridotto di quasi il 50% rispetto alla fig. 8. Infatti con 100 mW di potenza trasmessa, APs 802.11ah arrivano a coprire 600 metri massimi,

mentre quelli 802.11 solo 400. Risulta evidente che l'altezza dell'antenna di trasmissione ha un forte impatto sulle prestazioni di copertura e quindi una elevazione maggiore corrisponderà ad aree di copertura più grandi[8].

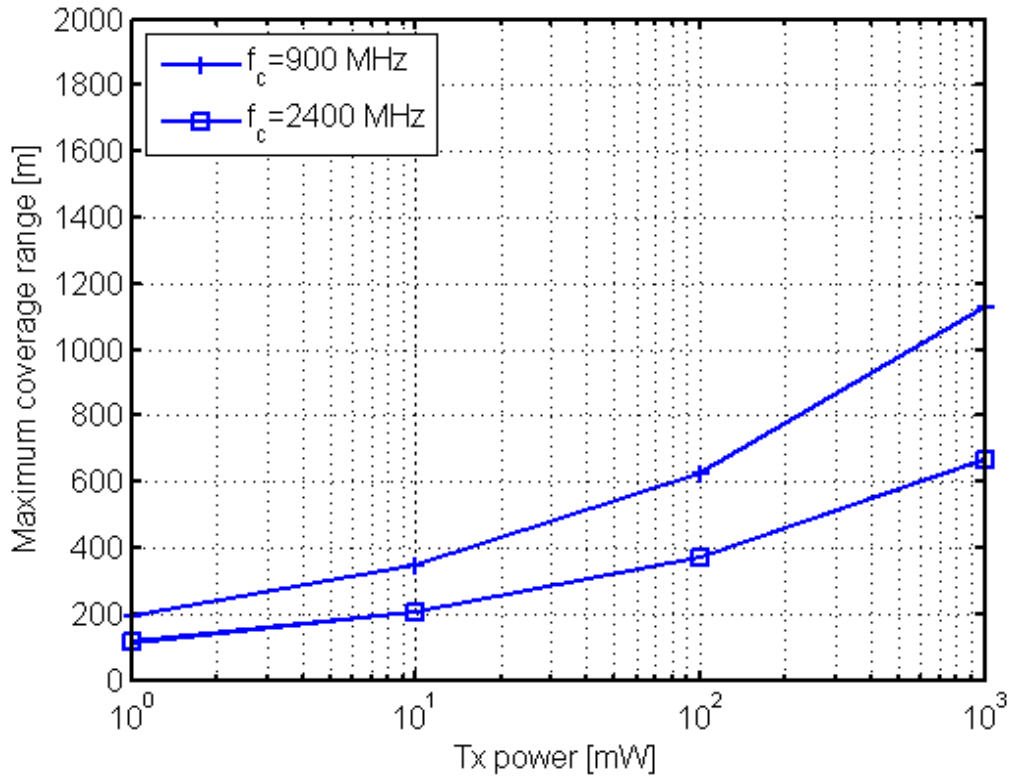


Figura 9: raggio massimo di copertura (5 m di altezza)[8]

IV.B Numero di Stazioni Wireless

Il numero massimo di stazioni wireless (STA) che si possono collegare a un punto di accesso WLAN (AP), come si può intuire, dipende dal raggio di copertura wireless di un singolo AP, definito dall'equazione (3), e dalla densità di STAs che ogni AP può coprire[8]. La relazione è davvero molto semplice ed è espressa dall'equazione 5:

$$N = \pi \left(\frac{r}{1000} \right)^2 \rho_{sta} \quad (5)$$

dove:

- N è numero di STAs all'interno dell'area di copertura AP;
- r è il raggio di copertura di un singolo AP espresso in metri;
- ρ_{sta} è la densità di copertura di STAs per km^2 per ogni AP.

In linea del tutto teorica, si è imposto che la densità di STAs in aree rurali sia di $20/km^2$, in aree sub-urbane di $500/km^2$, mentre in aree urbane di $2000/km^2$.

In figura 10 vengono riportate alcune stime relative al numero massimo di stazioni wireless coperte da un solo AP in funzione del raggio di copertura. Come si evince dal grafico, un AP con raggio di copertura di 1 km posizionato in aree rurali, arriva a coprire fino a 60 STAs; se invece il raggio di copertura si dimezza, la copertura arriva ad un massimo di 15 STAs. In aree sub-urbane e urbane, con raggio di copertura di 1 km, il numero di STAs diventa dell'ordine delle migliaia, circa 1500 in aree sub-urbane e più di 6000 in aree urbane. Questi ultimi due risultati sono del tutto ideali, come si vedrà in seguito, in quanto non si è tenuto conto di eventuali e probabili disturbi del segnale[8].

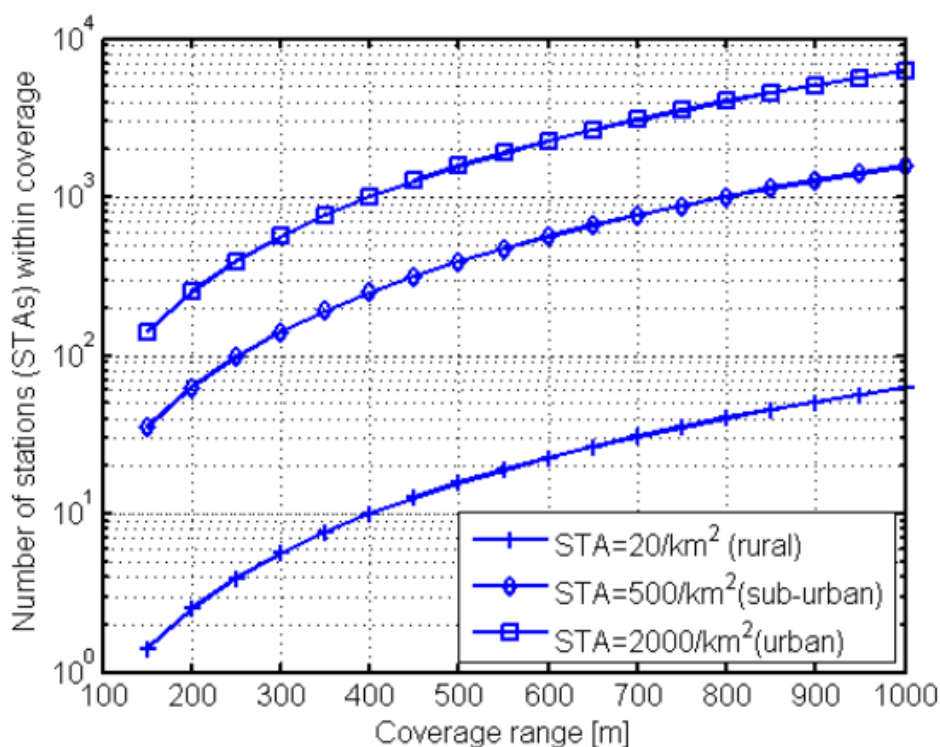


Figura 10: numero di STAs entro il raggio di copertura[8]

IV.C Probabilità d'errore

Definite le relazioni tra segnale e rumore, tentiamo ora di capire più in dettaglio come il rumore influisca sulle prestazioni della comunicazione: viene introdotto il concetto di *PER* (*Packet Error Rate*), che si può definire come *probabilità di errore di pacchetto*, ossia un valore espresso in percentuale che definisce il tasso d'errore dei pacchetti arrivati a destinazione rispetto a quelli inviati, a parità di dimensione di pacchetto L misurata in bit. I risultati sperimentali finora divulgati[5], suggeriscono che il valore migliore di *PER* ottenibile sia pari al 10% (cioè in pratica un pacchetto affetto da errore ogni 10), in accordo tra l'altro con i valori migliori effettivi di *PER* registrati in sistemi 802.11a, da cui derivano sistemi 802.11ah. Per pacchetto affetto da errore si intende un pacchetto che contiene uno o

più bit diversi rispetto all'intero pacchetto inviato: viene segnalato come erroneo indipendentemente se ne contiene 1, 2, ..., 100 o più.

In stretto legame con il *PER* è il *BER* (*Bit Error Rate*), che si può definire come *probabilità di errore di bit*, ossia un valore espresso in percentuale che definisce il tasso d'errore dei bit arrivati a destinazione rispetto ai bit inviati[5]. Da *PER* a *BER* il passo è breve. La relazione tra le due grandezze è infatti molto semplice:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (6)$$

dove L è il numero di bit di ogni pacchetto.

Vari studi sperimentali hanno dimostrato che il valore migliore di BER ottenibile da un sistema 802.11ah è di 3.2×10^{-6} [5]. Questo risultato che come detto sopra è una probabilità, è un dato molto convincente: fosse così infatti, statisticamente solo 0.32 bit arrivati a destinazione in ogni secondo su un totale di 100000 saranno affetti da errore. In tali condizioni, sostituendo i risultati numerici nell'equazione (6), otteniamo la grandezza di pacchetto L pari a 32768 bit, ovvero 4096 Byte, cioè 4 KByte.

Come spiegato in precedenza, i sistemi 802.11ah utilizzano modulazioni di segnale OFDM che a loro volta utilizzano modulazioni BPSK[5]. Per quest'ultima modulazione esiste una formula matematica particolare che ne descrive il *BER*, che viene definita nell'equazione 7:

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0/2}}\right) \quad (7)$$

dove:

- Q indica la funzione Q della gaussiana;
- E_b è la potenza di trasmissione di ogni singolo bit espressa in mW;
- N_0 è il rumore primario del sistema espresso in mW.

La densità di probabilità della funzione viene rappresentata come una gaussiana di media nulla e varianza $N_0/2$. Utilizzando i dati di *PER*, *BER* e L trovati sopra, scopriamo che il rapporto $(E_b/N_0)_{dB}$ è di 10 dB.

In realtà, considerando che la tecnologia 802.11ah non andrà utilizzata se non da dispositivi di misura e sensori, ci si rende conto che progettare pacchetti grandi 4 KByte non sia proprio la scelta migliore. Infatti nel migliore dei casi, cioè quando la velocità di trasmissione è costante a 100 kbps, arriverebbero a destinazione soltanto 3 pacchetti ogni secondo, un po' troppo poco.

Sempre secondo gli studi sperimentali condotti a riguardo[5], si è deciso di aumentare la probabilità *BER* ma facendo in modo di tenere stabile la probabilità *PER* sul 10%. Diminuendo il rapporto $(E_b/N_0)_{dB}$ a 8 dB, si potrà già assistere ad un miglioramento tangibile: infatti in tal caso il *BER* aumenterà al valore di 5.14×10^{-5} , ma sostituendo il risultato nell'equazione (6) si trova che la grandezza di pacchetto L è ora di 2048 bit, cioè

256 Byte. Quindi ogni 100000 bit inviati ogni secondo, statisticamente ce ne saranno 5 affetti da errore, un risultato tutto sommato ancora accettabile. Però, in tali circostanze arriveranno a destinazione quasi 50 pacchetti ogni secondo, a scapito dei 3 che sarebbero arrivati con pacchetti grandi 4 KByte.

Gli sviluppatori dello standard 802.11ah hanno impostato quest'ultimo valore (256 Byte) come grandezza di ogni pacchetto, mentre il valore trovato in precedenza (4 KByte) verrà lasciato solamente come valore di idealità se in avvenire sarà veramente importante utilizzare comunicazioni quasi del tutto prive di errori.

IV.D Probabilità di interruzione

Nella progettazione di sistemi di comunicazione wireless un requisito fondamentale è quello di ottenere un grado minimo di qualità del servizio. In pratica si tratta di far in modo che in ogni punto all'interno della zona di copertura di un AP, si riesca ad avere una ricezione "soddisfacente".

In qualunque ambiente, il segnale è soggetto a *multipath fading*, ossia un fenomeno che rende il segnale in ricezione distorto da un certo numero di repliche di se stesso, sfasate nel tempo e originate da vari percorsi che il segnale stesso può aver seguito durante la sua propagazione [8]. A causa di questo, il segnale ricevuto può essere definito appunto come soddisfacente, se il segnale non ha subito distorsione o comunque il ricevitore è in grado di ignorare le repliche del segnale, o insoddisfacente, se è stato vittima della multipath fading, e in questo caso si parla di *probabilità di interruzione*, proprio perchè viene interrotta temporaneamente (comunque pochi ms) tutta la comunicazione.

Inoltre, un altro fattore che influisce sulla probabilità di interruzione, e che attenua il segnale è la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore: infatti un ricevitore che si trova molto distante dal trasmettitore riceverà un segnale decisamente più debole rispetto ad uno posto nelle vicinanze. Questo fenomeno di attenuazione si chiama *path loss*, ossia *perdita di percorso* [6].

Idealmente, un sistema di comunicazione può essere rappresentato come in figura 11: un trasmettitore con la sua potenza, il suo guadagno e la sua perdita, il mezzo trasmissivo che interferisce col segnale generando il path loss, e infine il ricevitore con la sua potenza, il suo guadagno e la sua perdita.

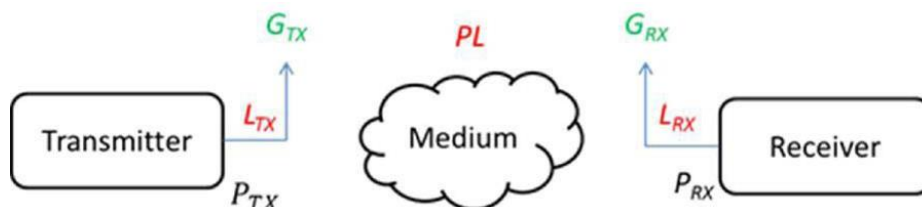


Figura 11: sistema di comunicazione ideale

Esiste una relazione molto importante che lega matematicamente tutti i fattori descritti nella figura 11[2], sotto forma dell'equazione 8:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - PL + G_{rx} - L_{rx} \quad (8)$$

dove:

- P_{rx} è la potenza del ricevitore espressa in dBm;
- P_{tx} è la potenza del trasmettitore espressa in dBm (0, 10, 20, 30 dBm);
- G_{tx} è il guadagno di potenza del trasmettitore espresso in dB (3 dB);
- L_{tx} è la perdita del trasmettitore espressa in dB;
- PL è il path loss espresso in dB;
- G_{rx} è il guadagno di potenza del ricevitore espresso in dB (3 dB);
- L_{rx} è la perdita del ricevitore espressa in dB.

Ai fini del nostro interesse, utilizzeremo questa formula non per calcolare la potenza minima ricevuta, ma per determinare la probabilità di interruzione, in funzione della distanza, che per sistemi wireless generici deve essere pari o possibilmente inferiore a 1% [5].

Si può immaginare che la curva che descrive la potenza ricevuta abbia un andamento inversamente proporzionale al quadrato della distanza, ovvero più il ricevitore sarà lontano dal trasmettitore, meno sarà la potenza ricevuta e viceversa. Al valore massimo di raggio di copertura di un AP (cioè 1000 m), la potenza ricevuta minima può essere assunta di -60 dBm [5].

Per rendere più semplice il calcolo, in primo luogo tralasciamo la perdita del trasmettitore. In secondo luogo convertiamo la perdita del ricevitore in multipath fading: ciò può essere fatto immaginando tale disturbo come se fosse una variabile aleatoria gaussiana con media nulla e varianza σ^2 di 16 dB (in accordo ai valori sperimentali condotti in aree rurali) [5].

Per quanto riguarda il calcolo del path loss, esistono diversi modelli matematici (come il modello di Lee e quello di Hata, tra i più famosi [6]), diversi per ogni ambiente e aventi parametri e variabili che al momento non interessano. Inoltre, c'è la necessità di distinguere se le stazioni wireless sono all'interno o all'esterno di edifici e si parla allora di scenari *outdoor* (spazi aperti) e *indoor* (spazi chiusi), poichè entrano in gioco dei parametri differenti.

Scenari outdoor. Per scenari di spazi aperti, si utilizza il seguente modello semplificato di base [6]:

$$PL = L_0 + k_1 \log_{10}(f) + k_2 \log_{10}(h_{tx}) \log_{10}(d) \quad (9)$$

dove:

- PL è il path loss espresso in dB;
- f è la frequenza espressa in Hz;
- h_{tx} è l'altezza dell'antenna del trasmettitore espressa in m;
- d è la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore espressa in m;

- L_0, k_1, k_2 , sono delle variabili che rappresentano l'ambiente esterno.

Scenari indoor. Per scenari di spazi chiusi invece, il modello è un po' più complicato[5]. Infatti oltre che utilizzare altri parametri, bisogna anche impostare una distanza di breakpoint (che può ad esempio rappresentare la lunghezza di una stanza, di un ufficio, di un magazzino, etc.) e in base a quella capire se utilizzare o no l'altra formula:

$$PL = L_I = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d}{c} \right) \quad \text{per } d < d_{BP} \quad (10)$$

$$PL = L_I + 3.5 \log_{10} \left(\frac{d}{d_{BP}} \right) \quad \text{per } d > d_{BP} \quad (11)$$

dove:

- f è la frequenza di utilizzo espressa in Hz;
- d è la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore espressa in m;
- c è la velocità della luce espressa in m/s;
- d_{BP} è la distanza di breakpoint espressa in m.

Questo caso di path loss viene spesso ignorato per le aree rurali, mentre è quasi di primaria importanza per le aree urbane, dove la presenza di stabili ed edifici è molto più probabile.

A questo punto abbiamo tutti gli strumenti per calcolare la probabilità di interruzione di un sistema wireless 802.11ah in funzione della distanza tra il trasmettitore e il ricevitore[5]. Tale probabilità si calcola tramite l'equazione 12:

$$P_{out} = 1 - Q \left(\frac{P_{min} - (P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL)}{\sigma} \right) \quad (12)$$

dove:

- P_{out} è la probabilità di interruzione;
- Q è la funzione Q della gaussiana;
- P_{min} è la potenza minima ricevuta (-60 dBm);
- P_{tx} è la potenza del trasmettitore espressa in dB (10, 20, 30 dB);
- G_{tx} è il guadagno di potenza del trasmettitore espresso in dB (3 dB);
- G_{rx} è il guadagno di potenza del ricevitore espresso in dB (3 dB);
- PL è il *path loss* espresso in dB;
- σ è la deviazione standard della gaussiana che rappresenta l'effetto di *multipath fading* espressa in dB (8 dB);

In figura 12 viene rappresentato il grafico relativo alle varie probabilità di interruzione in funzione della distanza[8]. Per quanto concerne la probabilità in aree rurali, il calcolo è stato eseguito inserendo i parametri di frequenza a 900 MHz e altezza antenna AP a 15 m e potenza di trasmissione a 20 dB. Per il calcolo del path loss si è ignorato il caso indoor e per quanto riguarda il caso outdoor di sono impostati i valori sperimentali 3.5, 0.5 e 30

rispettivamente per L_0, k_1, k_2 [5]. Si noti che per quanto riguarda le aree sub-urbane e urbane, si sono utilizzati modelli matematici di path loss specifici per tali ambienti e le probabilità di interruzione risultano più elevate rispetto a quelle relative ad ambienti rurali.

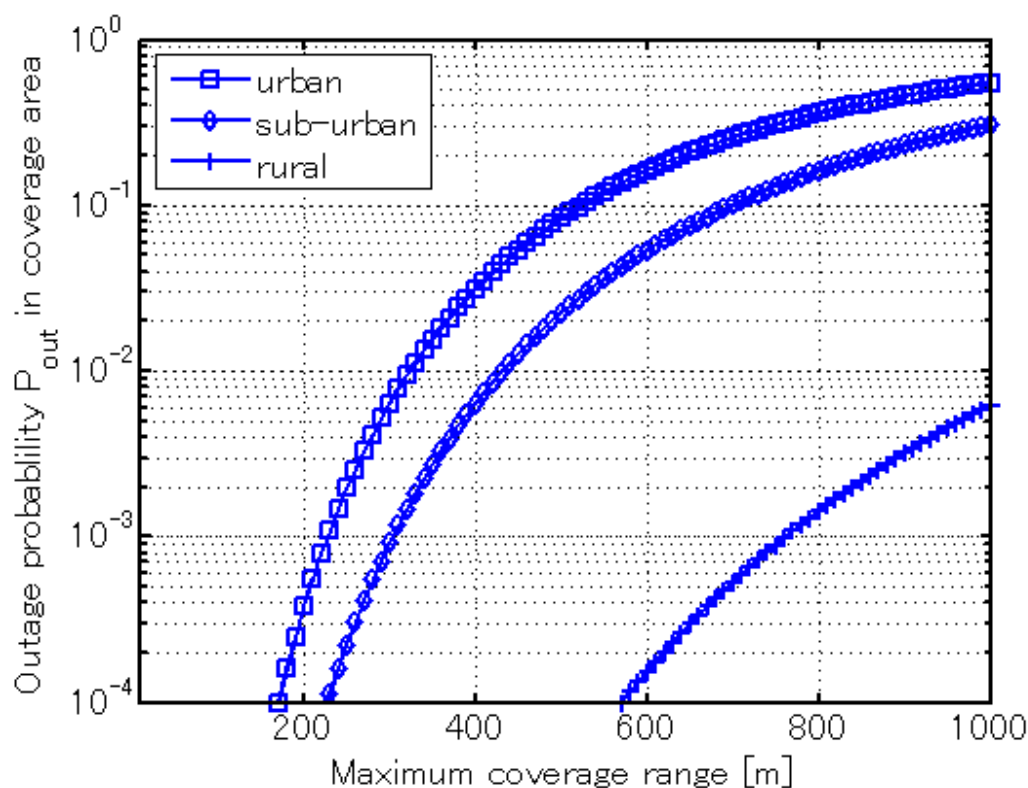


Figura 12: probabilità di interruzione

S'era detto in precedenza che per sistemi wireless generici, il limite di probabilità di interruzione sotto il quale il segnale ricevuto è soddisfacente è di 1%, ovvero 0,01[5]. Secondo il grafico, la curva delle probabilità in aree rurali (quella più a destra) costituisce un risultato molto importante: infatti la curva è interamente al di sotto della soglia di 1%, con probabilità addirittura molto minori ad esempio già a 600 metri (0,01%).

Per quanto riguarda le aree sub-urbane e urbane, invece, gran parte delle curve superano il limite e non di poco. Secondo il grafico, ad esempio, un ricevitore posto a 1000 metri dal trasmettitore in aree urbane, ha una probabilità di interruzione di oltre il 60%, cosa che decisamente non va bene. Tra le altre cose, questo spiega perchè lo standard IEEE 802.11ah sia stato progettato quasi unicamente per grandi spazi aperti.

Una delle soluzioni per arginare il problema dell'elevata probabilità di interruzione in aree sub-urbane e urbane è quella di diminuire il raggio massimo di copertura del trasmettitore AP per tali ambienti[5], in modo che la soglia limite sia quantomeno pari a 1%.

- **Aree sub-urbane.** Per le aree sub-urbane il raggio di copertura massimo di un Access Point è stato ridotto a 400 metri. Così facendo, secondo l'equazione (5), tenendo buona l'ipotesi di avere una densità di stazioni wireless sotto copertura di

$500/km^2$, un singolo AP potrà coprire fino a 250 STAs (a scapito delle 1500 che si avrebbero coperte senza fattori di disturbo come il multipath fading e path loss);

- **Aree urbane.** Per le aree urbane il raggio di copertura massimo di un AP è stato ridotto a 300 metri. Così facendo, sempre secondo l'equazione (5), tenendo buona l'ipotesi di avere una densità di stazioni wireless sotto copertura di $2000/km^2$, un singolo AP potrà coprire fino a 565 STAs (a scapito delle 6000 che si avrebbero coperte senza fattori di disturbo come il multipath fading e il path loss).

Osservando questi due ultimi aggiustamenti, si può notare che esiste una grossissima differenza tra idealità e realtà: inoltre si noti che abbiamo tenuto conto solo di alcuni tipi di disturbo del segnale. Se si tenesse conto di tutte le attenuazioni e rumori, certamente parametri come il raggio di copertura e il numero di stazioni wireless coperte subirebbero ancora dei cambiamenti anche per ciò che riguarda le aree rurali. Tuttavia è giusto osservare che il modello matematico che si vuole adottare, deve essere non troppo ideale, ma neanche troppo specifico.

V. CONCLUSIONI

In questo documento sono stati analizzati gli aspetti e le prospettive future dello standard IEEE 802.11ah, che diventerà operativo a partire dal 2016. Si è detto di come sia uno standard di reti wireless che utilizza frequenze meno congestionate inferiori a 1 GHz, che sia in grado di spaziare distanze vaste al massimo 1 km e che sia in grado di consumare pochissima energia, sia in trasmissione sia in ricezione: in pratica uno standard appositamente voluto principalmente per aree rurali, o comunque ampi spazi aperti.

Si è visto poi che gli interventi si sono fatti al livello fisico (PHY) e MAC del modello di rete ISO-OSI, che si sia utilizzata la modulazione MIMO-OFDM con singole modulazioni BPSK, che si siano utilizzate frequenze inferiori a 1 GHz e potenze di trasmissione inferiori a 10-20dBm, in accordo con le normative dei singoli governi, e che si sia adoperata la tecnica CSMA/CA per la modalità di trasmissione nel canale, Si sono inoltre paragonate le altre tecnologie affini allo 802.11ah, come ZigBee e Bluetooth.

Sono stati visti i vari casi d'uso per aree rurali, come le Smart Grids, le reti di sorveglianza, le reti di Smart Farming, reti di sensori per parchi nazionali e le reti di sensori meteorologici.

Si sono viste infine i risultati numerici e i relativi grafici per tutta una serie di progettazioni ingegneristiche riguardo ad esempio il raggio massimo di copertura, la grandezza di pacchetto, la probabilità d'errore, il numero di stazioni wireless sotto copertura, il path loss e la probabilità di interruzione.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1]"Reti di calcolatori - 5° edizione" Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall, PEARSON, 2011, ISBN 9788871926407;
- [2]"Elementi di comunicazioni elettriche" G. Calvagno, G. Pierobon, R. Rinaldo, 2012, Padova, Libreria Progetto;
- [3]"<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>" IEEE Computer Society, New York;
- [4]"[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/IEEE 80 2.11ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 GHz Wi-Fi.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/IEEE%202.11ah:Advantages+in+standards+and+further+challenges+for+sub+1+GHz+Wi-Fi.pdf)" S. Aust, T. Ito, Nec Communication System Ltd., Kanagawa, R. Prasad, I. Niemegeers, Delft University of Technology, Delft;
- [5]"[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Feasibility+study+of+IEEE+802.11ah+radio+technology+for+IoT+and+M2M+use+cases.pdf)" A. Hazmi, J. R. and M. Valkama, Department of Communications Engineering, Tampere University of Technology, Tampere;
- [6]"[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Sub 1GHz wireless LAN propagation path loss models for urban smart grid applications.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Sub+1GHz+wireless+LAN+propagation+path+loss+models+for+urban+smart+grid+applications.pdf)" S. Aust, T. Ito, Nec Communication System Ltd., Kanagawa;
- [7]"[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Smart utility networks in TV white space.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Smart+utility+networks+in+TV+white+space.pdf)" C. Sum, H. Harada, F. Kojima, Z. Lan, R. Funada, NICT, Kyoto;
- [8]"[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Sub 1GHz wireless LAN deployment scenarios and design implications in rural areas.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/IEEE802.11ah/Sub+1GHz+wireless+LAN+deployment+scenarios+and+design+implications+in+rural+areas.pdf)" S. Aust, T. Ito, Nec Communication System Ltd., Kanagawa;
- [9] "Simulation models for the performance evaluation of spectrum sharing techniques in OFDMA networks", L. Anchora, M. Mezzavilla, L. Badia, M. Zorzi, Proceedings ACM MSWiM, Miami Beach, FL, United States, November 2011;
- [10] "A joint technical and micro-economic investigation of pricing data services over wireless LANs" L. Badia, F. Rodaro, M. Zorzi, Proceedings IEEE IWCMC 2006, Vancouver (BC), Canada, July 2006;
- [11] "Multi-radio resource allocation strategies for heterogeneous wireless networks" L. Badia, C. Taddia, G. Mazzini, M. Zorzi, Proceedings WPMC 2005, Aalborg (Denmark), September 2005;

- [12] "Data aggregation algorithms for sensor networks with geographic information awareness" L. Badia, E. Fasolo, A. Paganini, M. Zorzi, Proceedings WPMC 2006, San Diego (CA), USA, September 2006;
- [13]"<http://odysseus.ieee.org/query.html/IEEE802.11ah/11-11-0672-00-00ah-network-management-consideration-for-functional-requirement>" J. Zhang, B. Zhang, D. Zhang, ZTE Corporation, Shanghai;
- [14]"<http://odysseus.ieee.org/query.html/IEEE802.11ah/11-11-1138-00-00ah-packet-radio-mode-for-802-11ah-a-b-g-n.ppt>" P. Gardner, R. Challans, The Serval Project Inc, Hove;
- [15]"<http://odysseus.ieee.org/query.html/IEEE802.11ah/11-11-0268-00-00ah-additional-ieee-802-11ah-use-cases>" P. Fang, Z. Ding, Huawei Technologies Co., Ltd., Guangdong;
- [16]"<http://odysseus.ieee.org/query.html/IEEE802.11ah/11-11-0971-01-00ah-warning-signal-transmitting-requirements-in-ieee-802-11ah.ppt>" G. Khang, D. Liu, Z. Luo, B. Sun, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing;
- [17]"<http://odysseus.ieee.org/query.html/IEEE802.11ah/11-11-0970-01-00ah-ieee-802-11ah-healthcare-use-cases.ppt>" L. Zheng, J. Zhu, BHWeHealth, Beijing;
- [18]" [http://www.zigbee.org/LearnMore/WhitePapers/ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works.doc](http://www.zigbee.org/LearnMore/WhitePapers/ZigBee%20Technology%20Wireless%20Control%20that%20Simply%20Works.doc)" P. Kinney, Kinney Consulting LLC / Chair of IEEE 802.15.4 Task Group;
- [19]" [https://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications/ Core Version 2.0.pdf](https://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications/Core%20Version%202.0.pdf)" W.Park, L.Jones, G.Robinson.