Azzolini Riccardo 2020-09-24

Reti wireless

1 Reti wireless

Il termine **rete wireless** indica in generale una rete in cui i terminali accedono a essa tramite canali "senza fili" (tipicamente via radio). Esistono poi varie sotto-categorie di reti wireless:

- le **wireless LAN** (**WLAN**) sono reti wireless che forniscono coperture e servizi tipici di una LAN;
- le **reti radiomobili** sono reti wireless in cui i terminali utenti possono spostarsi sul territorio senza perdere la connettività con la rete;
- le **reti cellulari** sono reti radiomobili la cui copertura geografica è ottenuta mediante una tassellatura di aree adiacenti e/o sovrapposte, che prendono il nome di *celle*.

È dunque importante sottolineare che "rete wireless" e "rete mobile" *non sono sinonimi*.

1.1 Esempi di standard per reti wireless

Esistono numerosi standard / tecnologie per le reti wireless, pensati per realizzare reti di estensioni diverse, dalle PAN (Personal Area Network, reti ancora più piccole delle LAN) fino alle WAN. Alcuni dei principali sono

- per le PAN: IEEE 802.15 (Bluetooth);
- per le LAN: IEEE 802.11 (Wi-Fi);
- per le MAN: IEEE 802.16 (WiMAX, che però non si è mai particolarmente diffuso);
- per le WAN: i numerosi standard per le varie generazioni di reti mobile (tra cui ad esempio EDGE, GPRS, LTE, ecc.).

2 Onde elettromagnetiche

Il principale mezzo fisico usato per le reti wireless sono le **onde elettromagnetiche** (onde radio / microonde, infrarossi, ecc.). Ogni onda elettromagnetica è caratterizzata da:

- Una **frequenza** f, che può essere definita in generale come il numero di "giri" (in questo caso oscillazioni del campo elettromagnetico) compiuti nell'unità di tempo. La sua unità di misura è l'hertz, che è il **reciproco di un secondo**: $\mathrm{Hz} = \mathrm{s}^{-1} = \frac{1}{\mathrm{s}}$.
- Una **lunghezza d'onda** λ, che è la distanza tra due creste d'onda (o, in generale, tra punti ripetitivi dell'onda). In quanto distanza, essa si misura in metri (e multipli/sottomultipli del metro).

La frequenza e la lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali, secondo la relazione

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove $c \approx 3 \cdot 10^8 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ è la *velocità della luce nel vuoto* (per semplicità, nei calcoli si suppone tipicamente che la trasmissione di onde elettromagnetiche avvenga appunto nel vuoto). L'esistenza di questa relazione significa che specificare la lunghezza d'onda o la frequenza di un'onda elettromagnetica è equivalente: data l'una si può sempre ricavare immediatamente l'altra.

L'insieme di tutte le possibili lunghezze d'onda / frequenze delle onde elettromagnetiche prende il nome di *spettro elettromagnetico*.

3 Antenne

Un'**antenna** è un conduttore (o sistema di conduttori) alimentato (cioè che riceve energia elettrica) in grado di trasmettere e/o ricevere informazioni mediante onde elettromagnetiche.

L'intensità delle onde elettromagnetiche trasmesse (o ricevute) da un'antenna prende il nome di **potenza**, ed è misurata in *watt* (W) e multipli/sottomultipli (ad esempio, si usano molto spesso i milliwatt, mW).

Un'antenna **isotropica** o **omnidirezionale** (ideale) irradia la stessa potenza in tutte le direzioni. Invece, un'antenna **direttiva** concentra la potenza emessa in una particolare direzione: ciò aumenta la forza del segnale ricevuto, e riduce l'interferenza con gli altri ricevitori, ma aumenta la complessità del sistema.

3.1 Guadagno di antenna

Il più importante parametro che caratterizza un'antenna è il **guadagno di antenna** G. Nel caso di un'antenna usata per trasmettere, esso è il rapporto tra la potenza irradiata dall'antenna in una particolare direzione[1] e la potenza del segnale fornito in ingresso all'antenna (analogamente, nel caso della ricezione, si considera il rapporto tra la potenza del segnale generato in uscita dall'antenna e la potenza delle onde elettromagnetiche ricevute da una determinata direzione).

Equivalentemente, il guadagno di antenna può essere definito come il rapporto tra la potenza irradiata/ricevuta in una certa direzione dall'antenna considerata e la potenza irradiata/ricevuta in una qualunque direzione da un'antenna isotropica ideale.

Essendo un rapporto tra due potenze, il guadagno di antenna è un valore *adimensionale*, un numero puro senza unità di misura (perché le unità al numeratore e al denominatore — entrambe watt o multipli/sottomultipli — si semplificano).

4 Decibel

I **decibel** (dB) sono una scala logaritmica (non sono una "vera" unità di misura) usata per indicare un rapporto tra la potenza di due segnali (ad esempio, si può usare per esprimere il guadagno di un'antenna). Date due potenze P_1 e P_2, il valore in decibel del loro rapporto è dato dalla formula

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{(\mathrm{dB})} = 10\log_{10}\frac{P_1}{P_2}$$

L'uso di una scala logaritmica permette di rappresentare facilmente al tempo stesso numeri molto grandi e numeri molto piccoli, che spesso si incontrano nell'ambito delle telecomunicazioni (nel quale si trattano, indicativamente, gli ordini di grandezza da 10^{-12} a 10^9).

4.1 Esempi

Per calcolare il valore in decibel di un rapporto tra due potenze P_1 e P_2 a partire dal valore del rapporto in scala lineare ("normale", non logaritmica), è sufficiente inserire i valori delle potenze (o direttamente il valore del rapporto) nella formula data sopra. Ad esempio, se $\frac{P_1}{P_2} = 3$, allora

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{(\mathrm{dB})} = 10\log_{10}\frac{P_1}{P_2} = 10\log_{10}3 \approx 4.77\,\mathrm{dB}$$

[1] Se la direzione non è specificata, si considera solitamente quella in cui la potenza irradiata è massima.

Il calcolo inverso, dai decibel alla scala lineare, è invece più complesso. Ad esempio, sapendo che il rapporto tra due potenze è di 20 dB, per ricavare il valore del rapporto in scala lineare

1. si inserisce il valore in dB nella formula data sopra:

$$20\,\mathrm{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

2. si dividono entrambi i membri per 10, al fine di isolare il logaritmo:

$$\frac{20}{10} = \frac{10}{10} \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$
$$2 = \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

3. si applica a entrambi i membri l'operazione inversa del logaritmo, che è l'esponenziale con base uguale a quella del logaritmo (qui 10):

$$10^2 = 10^{\log_{10} \frac{P_1}{P_2}}$$

4. per una delle proprietà del logaritmo, si semplifica il secondo membro:

$$10^2 = \frac{P_1}{P_2}$$

Dunque, il valore in scala lineare del rapporto di potenze è 100.

Come altro esempio, il valore lineare corrispondente a $-35\,\mathrm{dB}$ è:

$$-35\,\mathrm{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$
$$-3.5 = \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$
$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{-3.5} \approx 0.000\,32$$

4.2 Uso dei decibel per i valori assoluti

Oltre che per i rapporti tra potenze, l'uso di una scala logaritmica è utile anche per i valori assoluti di potenza (che sono grandezze espresse in watt o multipli/sottomultipli, non grandezze adimensionali come i rapporti trattati finora). Per fare ciò, si ricorre allo stratagemma di fissare il denominatore del rapporto a una potenza di riferimento, tipicamente 1 mW o 1 W, rispetto alla quale si esprime la potenza desiderata. Allora, si indica

- con dBm una potenza in milliwatt rappresentata in scala logaritmica:

$$P_{(\mathrm{dBm})} = 10\log_{10}\frac{P}{1\,\mathrm{mW}} = 10\log_{10}P_{(\mathrm{mW})}$$

- con dBW (che si legge "dB watt") una potenza in watt rappresentata in scala logaritmica:

$$P_{(\mathrm{dBW})} = 10\log_{10}\frac{P}{1\,\mathrm{W}} = 10\log_{10}P_{(\mathrm{W})}$$

4.2.1 Esempi

Le conversioni tra la scala lineare e i dBm o dBW si effettuano sostanzialmente come quelle per i dB. Ad esempio:

- Una potenza di $1000\,\mathrm{mW} = 1\,\mathrm{W}$ corrisponde a:

$$\begin{aligned} 10\log_{10}(1000\,\mathrm{mW}) &= (10\cdot 3)\,\mathrm{dBm} = 30\,\mathrm{dBm} \\ 10\log_{10}(1\,\mathrm{W}) &= (10\cdot 0)\,\mathrm{dBW} = 0\,\mathrm{dBW} \end{aligned}$$

- Per convertire $-5\,\mathrm{dBm}$ in un valore lineare di potenza in mW si effettuano i soliti passaggi:

$$\begin{aligned} -5\,\mathrm{dBm} &= 10\log_{10}P_{(\mathrm{mW})} \\ -0.5 &= \log_{10}P_{(\mathrm{mW})} \\ P &= 10^{-0.5}\,\mathrm{mW} \approx 0.32\,\mathrm{mW} \end{aligned}$$

- Analogamente, per convertire $20\,\mathrm{dBW}$ in W:

$$\begin{aligned} 20\,\mathrm{dBW} &= 10\log_{10}P_{(\mathrm{W})} \\ 2 &= \log_{10}P_{(\mathrm{W})} \\ P &= 10^{2}\,\mathrm{W} = 100\,\mathrm{W} \end{aligned}$$

Per convertire invece tra dBm e dBW, il modo più intuitivo è passare dalla scala lineare, sfruttando semplicemente la relazione $1\,\mathrm{W} = 1000\,\mathrm{mW} = 10^3\,\mathrm{mW}$. Ad esempio:

$$33\,\mathrm{dBm} = 10^{3.3}\,\mathrm{mW} = (10^{0.3}\cdot 10^{3})\,\mathrm{mW} = 10^{0.3}\,\mathrm{W} = 3\,\mathrm{dBW}$$

(qui sono stati omessi, per brevità, i singoli passaggi delle conversioni tra le scale lineare e logaritmica).

4.3 Proprietà dei logaritmi

Quando si effettuano calcoli con valori in dB, dBm o dBW, è necessario applicare le proprietà dei logaritmi. Considerando ad esempio il caso di potenze in dBm (i casi di dB e dBW sono identici):

$$
\begin{aligned}
(P_1 \cdot P_2)_{(\mathrm{dBm})} &= P_{1\,(\mathrm{dBm})} + P_{2\,(\mathrm{dBm})} \\
\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{(\mathrm{dBm})} &= P_{1\,(\mathrm{dBm})} - P_{2\,(\mathrm{dBm})} \\
\left(P^k\right)_{(\mathrm{dBm})} &= k \cdot \left(P_{(\mathrm{dBm})}\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
(P_1 + P_2)_{(\mathrm{dBm})} &\neq P_{1\,(\mathrm{dBm})} + P_{2\,(\mathrm{dBm})} \\
(P_1 - P_2)_{(\mathrm{dBm})} &\neq P_{1\,(\mathrm{dBm})} - P_{2\,(\mathrm{dBm})}
\end{aligned}
$$

5 Relazione tra potenza in trasmissione e in ricezione

Quando si trasmette un segnale radio tra due stazioni, la potenza del segnale che giunge alla stazione ricevente è data dalla formula

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

dove:

- P_{RX} è appunto la *potenza in ricezione* (cioè quella del segnale generato in uscita dall'antenna della stazione ricevente);
- P_{TX} è la *potenza in trasmissione* (cioè la potenza del segnale che la stazione trasmittente manda in ingresso alla sua antenna);
- G_{TX} e G_{RX} sono rispettivamente i *guadagni di antenna* della stazione trasmittente e di quella ricevente;
- λ è la *lunghezza d'onda* delle onde elettromagnetiche trasmesse;
- R è la *distanza del collegamento* (ovvero la distanza tra le due stazioni).

Questa formula può essere usata per determinare il **raggio** (range) **di copertura** di una rete wireless, calcolando la distanza entro cui la potenza in ricezione rimane maggiore o uguale alla minima potenza che la stazione ricevente è in grado di captare, ovvero ricavando la seguente formula inversa:

$$
\begin{aligned}
P_{RX} &= P_{TX}G_{TX}G_{RX}\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \\
R^2 P_{RX} &= P_{TX}G_{TX}G_{RX}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \\
R^2 &= \frac{P_{TX}G_{TX}G_{RX}}{P_{RX}}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \\
R &= \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_{TX}G_{TX}G_{RX}}{P_{RX}}}
\end{aligned}
$$

Da questa formula si osserva che il raggio di copertura è:

- direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda, cioè inversamente proporzionale alla frequenza;
- direttamente proporzionale alle radici quadrate della potenza in trasmissione e dei guadagni di antenna;
- inversamente proporzionale alla radice quadrata della potenza (minima necessaria) in ricezione.

5.1 Formula in scala logaritmica

La formula appena data si applica a valori in scala lineare. Se i dati che si hanno sono invece in scala logaritmica, ci sono due modi equivalenti di procedere:

- trasformare i dati in scala lineare prima di inserirli nella formula;
- trasformare la formula in una versione che funzioni in scala logaritmica.

Per ottenere una versione logaritmica (cioè per potenze in dBm o dBW e guadagni in dB) di questa formula, si applica a entrambi i membri la regola di conversione in scala logaritmica e si semplifica usando le proprietà dei logaritmi:

$$
\begin{aligned}
10\log_{10} P_{RX} &= 10\log_{10}\left(P_{TX}G_{TX}G_{RX}\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right) \\
&= 10\left(\log_{10} P_{TX} + \log_{10} G_{TX} + \log_{10} G_{RX} + \log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right) \\
&= 10\left(\log_{10} P_{TX} + \log_{10} G_{TX} + \log_{10} G_{RX} + 2\log_{10}\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \\
&= 10\log_{10} P_{TX} + 10\log_{10} G_{TX} + 10\log_{10} G_{RX} + 20\log_{10}\frac{\lambda}{4\pi R} \\
P_{RX\,(\mathrm{dBm})} &= P_{TX\,(\mathrm{dBm})} + G_{TX\,(\mathrm{dB})} + G_{RX\,(\mathrm{dB})} + 20\log_{10}\frac{\lambda}{4\pi R}
\end{aligned}
$$

(qui le potenze sono indicate in dBm, ma la stessa formula può essere usata come potenze in dBW: l'importante è che entrambe le potenze siano espresse nella stessa unità/scala).

5.2 Attenuazione isotropica

Si chiama **attenuazione isotropica**, e si indica con A_0, il fattore

$$A_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

che compare nella formula per il calcolo della potenza in ricezione. Essa è direttamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda λ e inversamente proporzionale al quadrato della distanza del collegamento R.

Sapendo che la lunghezza d'onda è a sua volta inversamente proporzionale alla frequenza f,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

si deduce che l'attenuazione isotropica è anche inversamente proporzionale al quadrato della frequenza. Una formula alternativa per calcolarla è dunque

$$A_0 = \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2$$

che risulta più comoda quando (come spesso accade) si ha come dato di partenza la frequenza e non la lunghezza d'onda. Riscrivendo in questo modo l'attenuazione isotropica nella formula della potenza ricevuta (in versione lineare e logaritmica) si ottiene:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2$$

$$P_{RX(\mathrm{dBm})} = P_{TX(\mathrm{dBm})} + G_{TX(\mathrm{dB})} + G_{RX(\mathrm{dB})} + 20 \log_{10} \frac{c}{4\pi R f}$$

5.3 Esempio

Siano $P_{TX} = 5\,\mathrm{dBm}$, $G_{TX} = G_{RX} = 20\,\mathrm{dB}$, $f = 2.4\,\mathrm{GHz}$ e $R = 100\,\mathrm{m}$. Usando la formula in scala logaritmica e con l'attenuazione isotropica espressa in funzione della frequenza, si calcola direttamente che la potenza in ricezione è:

$$\begin{aligned}
P_{RX\,(\mathrm{dBm})} &= P_{TX\,(\mathrm{dBm})} + G_{TX\,(\mathrm{dB})} + G_{RX\,(\mathrm{dB})} + 20\log_{10}\frac{c}{4\pi R f} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 20\,\mathrm{dB} + 20\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{3\cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{4\pi\cdot 100\,\mathrm{m}\cdot 2.4\,\mathrm{GHz}} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{3\cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{4\pi\cdot 100\,\mathrm{m}\cdot 2.4\cdot 10^9\,\mathrm{s}^{-1}} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{3}{4\pi\cdot 2.4\cdot 10^3} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{3}{4\pi\cdot 24\cdot 10^2} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{1}{4\pi\cdot 8\cdot 10^2} \\
&= 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} + 20\log_{10}\frac{1}{32\pi\cdot 10^2} \\
&\approx 5\,\mathrm{dBm} + 40\,\mathrm{dB} - 80\,\mathrm{dB} \\
&= -35\,\mathrm{dBm}
\end{aligned}$$

Se si desidera, questa potenza può poi essere convertita in scala lineare:

$$P_{RX} = 10^{-3.5}\,\mathrm{mW} \approx 0.000\,32\,\mathrm{mW}$$