6 Interfaccia radio

Una delle caratteristiche fondamentali del servizio GPRS è quella di permettere il trasferimento dei dati senza filo, ovvero via radio. In questo capitolo viene esaminata in dettaglio l'interfaccia utilizzata dal GPRS per le comunicazioni radio tra la stazione mobile e la rete.

6.1 Gestione dei canali fisici

Come si è detto, il GPRS sfrutta lo stesso spettro del GSM, gli stessi canali (da 200 kHz ciascuno) e la stessa combinazione di sistemi di accesso multiplo a divisione di frequenza e di tempo. Gli utenti GPRS, quindi, condividono le stesse trame TDMA con gli utenti GSM, aumentando così la richiesta di risorse: un gestore GSM che supporti il servizio GPRS deve allocare canali fisici appositamente per il traffico dati a pacchetto su GPRS.

Il sistema GPRS risolve questo problema mediante l'allocazione dinamica delle risorse (ovvero dei canali fisici) tra servizi voce e dati (principio di *capacity on demand*). Alcuni dei canali configurati per essere utilizzati da servizi dati (detti PDCH, *Packet Data Channel*) possono infatti, all'occorrenza, essere riconfigurati in modo da venire utilizzati per chiamate vocali. Viceversa, canali allocati per il servizio voce ma non utilizzati possono essere configurati temporaneamente come PDCH, in modo da aumentare la qualità del servizio GPRS. In generale, tuttavia, nell'assegnazione dei canali viene data la precedenza al traffico a commutazione di circuito.

Inoltre, i canali fisici dedicati alla trasmissione di dati a commutazione di pacchetto sono allocati a una particolare MS solamente quando la MS in questione invia o riceve pacchetti di dati; grazie a questo principio di allocazione dinamica dei canali, diverse MS possono condividere uno stesso canale fisico. Specialmente nel caso di traffico intermittente, questo determina un'efficienza molto maggiore nell'uso delle risorse radio.

L'allocazione dinamica dei canali è controllata dai BSC. Per prevenire collisioni, la rete deve comunicare periodicamente alle MS quali canali sono disponibili: un *Uplink State Flag* (USF), contenuto nell'header dei pacchetti MAC in downlink, segnala se il corrispondente canale in uplink è libero o, in caso contrario, a quale MS è riservato. Ogni MS esamina gli USF contenuti nei pacchetti in downlink trasmessi sui canali allocati ed effettua la trasmissione dei propri dati solo sui canali di uplink consentiti. Se

un canale risulta libero, tutte le MS possono effettuare una richiesta arbitraria di accesso, a seguito della quale la rete provvederà all'assegnazione della risorsa. In questo modo è possibile non solo multiplare i flussi di diversi utenti sullo stesso canale fisico, ma anche rallentare o interrompere momentaneamente la trasmissione di alcuni di essi in favore di altri a priorità superiore.

I criteri con cui un BSC gestisce le risorse radio ad esso assegnate non sono specificati dagli standard, ma sono decisi autonomamente dai singoli gestori. Ad esempio, la strategia di assegnazione delle risorse radio ai terminali GPRS può avere come obiettivo la minimizzazione del numero dei canali da impiegare per il traffico a pacchetto: in questo caso, il BSC tenterà di multiplare il maggior numero possibile di MS sugli stessi timeslot, diminuendo il throughput per utente. Qualora invece l'obiettivo sia la massimizzazione del throughput degli utenti, si ridurrà il numero di connessioni multiplate sugli stessi timeslot e si utilizzerà un maggior numero di canali, eventualmente a scapito dei servizi a commutazione di circuito.

6.2 Canali logici

I canali logici definiti dallo standard GPRS per il servizio di trasporto dati a commutazione di pacchetto possono essere suddivisi, come mostra la Figura 6.1, in due categorie: canali di traffico e canali di controllo (o di segnalazione). A loro volta, i canali di controllo si dividono tra quelli che trasportano informazioni dirette a tutte le MS in una certa area e quelli che si riferiscono ad una particolare MS.

- Il ***Packet Traffic Channel*** (PTCH) è costituito da tre canali logici utilizzati per trasportare i dati degli utenti e le informazioni associate:
  - Il ***Packet Data Traffic Channel*** (PDTCH) è impiegato per la trasmissione dei dati dell'utente. È dedicato temporaneamente a una MS (per servizi PTP) o a un gruppo di MS (per servizi PTM). Una MS può utilizzare simultaneamente vari PDTCH in parallelo. Ogni PDTCH è unidirezionale, ovvero trasporta unicamente dati in uplink o in downlink. Per scambiare dati in entrambe le direzioni sono necessari (almeno) due canali distinti.
  - Il ***Packet Associated Control Channel*** (PACCH) trasporta informazioni di segnalazione relative a una singola MS, quali il controllo della potenza da

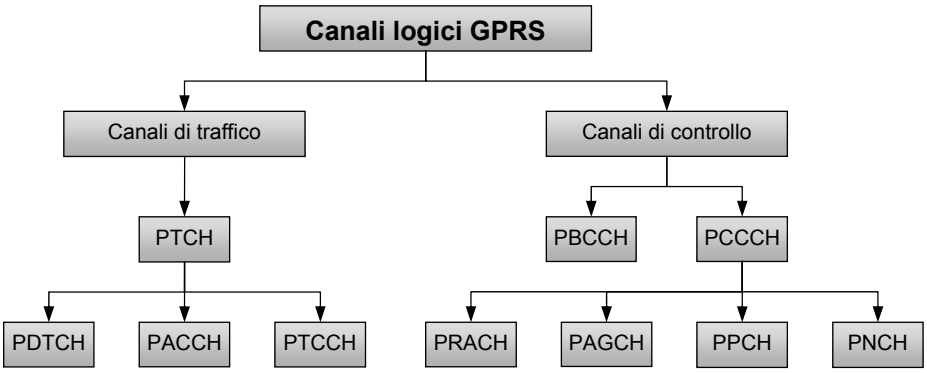

Figura 6.1. Classificazione dei canali logici GPRS

emettere, l'assegnazione delle risorse, le conferme dell'avvenuta ricezione dei dati. Un PACCH è sempre allocato in combinazione con uno o più PDTCH dedicati a una stessa MS.

- Il ***Packet Timing advance Control Channel*** (PTCCH) è usato per la sincronizzazione adattativa delle trame, ovvero per consentire la stima dell'anticipo di sincronizzazione necessario per il corretto trasferimento dei pacchetti di dati. La MS invia periodicamente dei burst di accesso alla BTS sul PTCCH/U (la parte di uplink del PTCCH); dal ritardo di questi burst è possibile derivare il corretto valore dell'anticipo di sincronizzazione; questo valore è poi trasmesso dalla BTS alla MS sulla parte di downlink del PTCCH, il PTCCH/D (v. par. 6.9).

- Il ***Packet Broadcast Control Channel*** (PBCCH) è un canale di controllo unidirezionale di tipo PTM utilizzato per trasmettere informazioni sull'organizzazione della rete GPRS (frequenze, identificativi, canali…) a tutte le MS presenti in una cella. Oltre a queste, il PBCCH può anche trasportare informazioni sul servizio a commutazione di circuito, in modo che una stazione mobile che implementi sia il GSM che il GPRS non sia costretta ad ascoltare anche il *Broadcast Control Channel* (BCCH) del GSM. Viceversa, il PBCCH può non essere presente, nel qual caso le informazioni sul servizio a commutazione di pacchetto possono essere trasportate dal BCCH.

- Il ***Packet Common Control Channel*** (PCCCH) è costituito da un insieme di canali logici che vengono utilizzati per trasportare messaggi di controllo nei casi in cui non siano ancora stati allocati canali dedicati a una singola MS. In generale, le informazioni trasportate sono finalizzate alla gestione dell'accesso alla rete. In base al particolare tipo di informazione si distinguono quattro sottocanali:

  - Il ***Packet Random Access Channel*** (PRACH) viene usato dalla MS per richiedere uno o più PDTCH in uplink. Le richieste da parte delle MS avvengono in istanti arbitrari, quindi su questo canale sono possibili collisioni tra i messaggi inviati dalle diverse MS.

  - Il ***Packet Access Grant Channel*** (PAGCH) è usato solo in downlink per allocare a una MS uno o più PDTCH, ovvero per inviare alla MS informazioni sull'assegnazione delle risorse.

  - Il ***Packet Paging Channel*** (PPCH) è usato dal BSS per stabilire la posizione di una MS prima di iniziare la trasmissione di pacchetti di dati in downlink; a seconda delle caratteristiche della rete e del terminale (che deve essere di classe A o B), il PPCH può anche essere usato per le procedure di paging relative a servizi a commutazione di circuito.

  - Il ***Packet Notification Channel*** (PNCH) è usato per informare un gruppo di MS dell'arrivo di messaggi di tipo PTM.

  Se in una cella non è disponibile il PCCCH, una MS può utilizzare il *Common Control Channel* (CCCH) del GSM per iniziare il trasferimento dei pacchetti.

6.3 Mappaggio dei canali logici sui canali fisici

I vari canali logici descritti in precedenza non richiedono necessariamente risorse fisiche separate, ma diversi di essi possono essere mappati sugli stessi canali fisici. Il mappaggio dei canali logici GPRS sui canali fisici a disposizione è realizzato mediante una tecnica a divisione di frequenza e di tempo (FDMA/TDMA). Così come per il GSM, il mappaggio in frequenza è basato sulla suddivisione della banda assegnata al servizio in diversi canali, tutti della stessa ampiezza (200 kHz), centrati su frequenze diverse; ognuno di questi canali è poi suddiviso in intervalli temporali di durata definita (577 μs ca.), detti timeslot. Otto timeslot successivi appartenenti allo stesso canale frequenziale costituiscono una trama TDMA. Lo standard GPRS prevede inoltre il raggruppamento di diverse trame TDMA in strutture multitrama, a loro volta suddivise in blocchi.

La Figura 6.2 mostra sull'asse verticale una singola trama TDMA composta da 8 timeslot (numerati da 0 a 7) e sull'asse orizzontale una struttura multitrama realizzata utilizzando il terzo timeslot di quella trama e di ognuna delle 51 trame TDMA successive.

Una struttura multitrama per un canale dati GPRS comprende appunto i timeslot corrispondenti (ovvero con lo stesso numero) di 52 trame TDMA. La struttura è divisa in 12 blocchi (*radio block*), numerati da B0 a B11, ognuno dei quali è costituito da 4 timeslot appartenenti a 4 trame TDMA successive. Ogni blocco, che può contenere fino a $114 \times 4 = 456$ bit di informazione, può essere assegnato a una diversa funzione logica. Oltre ai 12 radio block, ogni struttura multitrama comprende 2 slot riservati per la sincronizzazione, ovvero per la trasmissione del PTCCH, e 2 inattivi, che possono essere usati per la misura della potenza di interferenza. Siccome ogni trama ha una durata di $8 \times 0.577 \approx 4.615$ ms, la durata di una struttura multitrama è di $52 \times 4.615 \approx 240$ ms.

Ogni blocco radio della struttura multitrama può trasportare un solo tipo di canale logico, ovvero non è possibile il mappaggio di più di un canale sullo stesso blocco. Il mappaggio dei canali logici sui blocchi radio può però variare da blocco a blocco, ed è controllato da parametri trasmessi sul PBCCH. Lo standard GPRS definisce unicamente delle raccomandazioni su quali blocchi possono essere usati da un canale logico. Per di più, i canali in uplink e in downlink possono operare in maniera asimmetrica e indipendente: ad esempio, un canale dati può trasferire un pacchetto da una MS ad un

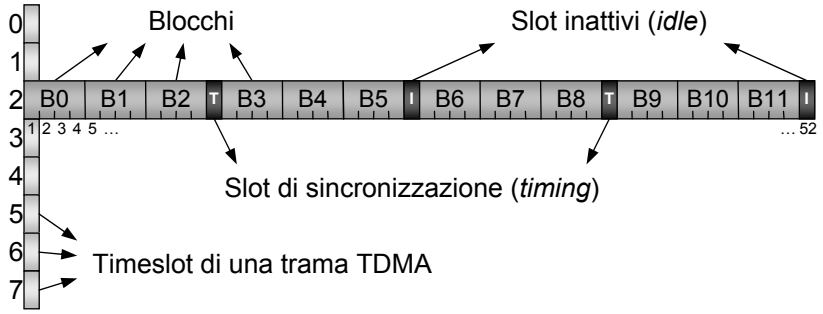

Figura 6.2. Struttura multitrama GPRS

BSS in un certo blocco in uplink, e, nel corrispondente blocco in downlink, trasferire un pacchetto diretto a una diversa MS.

Oltre alla struttura multitrama vista, composta da 52 trame, che può essere utilizzata da tutti i canali logici GPRS, è definita anche una struttura composta da 51 trame. Questa può venire usata unicamente da PCCCH e PBCCH. In downlink, questa struttura è costituita da 10 blocchi da 4 trame ciascuno più 11 trame inutilizzate (*idle*); in uplink, è composta da 51 trame per l'accesso arbitrario al mezzo. La sua durata è di circa 235.4 ms.

Canali	B10	B11	B12	B13
PDTCH	✓	✓	✓	✗
PBCCH	✓	✗	✗	✓
PCCCH	✓	✓	✗	✓
PACCH	✓	✓	✓	✗
PTCCH	✓	✓	✓	✗

Tabella 6.1. Combinazioni dei canali logici GPRS

Come si è detto, i canali logici elencati nel paragrafo 6.2 devono essere mappati sui canali fisici disponibili. Sono state definite quattro combinazioni di canali logici che possono essere mappati sullo stesso canale fisico; queste combinazioni sono mostrate in Tabella 6.1.

La prima combinazione, indicata con B10, consente di mappare su di uno stesso canale fisico tutte le categorie di canali logici; dato che ogni struttura multitrama comprende solo 12 blocchi utilizzabili per trasportare diversi canali logici, questa combinazione riduce il numero di canali disponibili per ogni categoria e quindi la velocità di trasferimento dei dati. La seconda combinazione (B11) ammette il mappaggio sullo stesso canale fisico di tutti i canali logici ad eccezione del PBCCH, in modo da aumentare la capacità del PCCCH e del PDTCH; questa combinazione può essere implementata solo se il PBCCH è trasportato da un altro canale fisico o se può essere utilizzato il corrispondente BCCH del GSM. La terza combinazione (B12) è riservata unicamente al trasporto dei dati dell'utente e di informazioni di segnalazione direttamente riferite all'utente stesso; questa, escludendo sia il PBCCH che il PCCCH, consente di trasportare più canali di traffico su uno stesso canale fisico, ma può essere ammessa solo se PBCCH e PCCCH sono trasportati da altri canali fisici o se possono essere utilizzati rispettivamente BCCH e CCCH. Infine, la combinazione B13 fa uso della struttura composta da 51 trame, precedentemente descritta, per trasportare solo PBCCH e PCCCH.

In alcuni casi è possibile applicare il concetto di sistema *master-slave*, configurando un canale fisico (*master*) in modo che trasporti tutti i canali logici (configurazione B10) e riservarne altri (*slave*) unicamente per il trasferimento di dati (configurazione B12); nei periodi in cui il traffico dati è scarso, questi ultimi possono venire allocati per servizi a commutazione di circuito senza pregiudicare il corretto funzionamento del sistema.

Canali	M9	M10
PDTCH	✗	✓ (n + m)
PBCCH	✓	✗
PCCCH	✓	✗
PACCH	✗	✓
PTCCH	✗	✓

Tabella 6.2. Combinazioni dei canali logici utilizzabili dalla MS

Oltre alle limitazioni sui canali logici che possono essere mappati sullo stesso canale fisico, ne esiste un'altra riguardante le stazioni mobili: queste infatti, a seconda dello stato in cui si trovano, possono utilizzare solo un sottoinsieme

dei canali logici offerti dalla stazione base. Con riferimento alla Tabella 6.2, la combinazione M9 si riferisce ad una stazione mobile che si trovi nello stato *idle*, mentre la combinazione M10 fa riferimento ad una stazione mobile attiva con la capacità di gestire contemporaneamente diversi slot. Nella tabella, *n* è il numero di PDTCH che permettono una trasmissione bidirezionale, *m* il numero di quelli che permettono solo trasmissioni unidirezionali. Secondo lo standard GPRS, per una MS *n* può andare da 1 a 8, *m* da 0 a 8, la somma *n* + *m* da 1 a 8.

6.4 Configurazioni multi-slot

Una configurazione multi-slot consiste in un insieme di canali a commutazione di pacchetto o di circuito, unitamente ai canali di controllo ad essi associati, riservati tutti alla stessa stazione mobile. Nel GPRS, una configurazione multi-slot può interessare fino a 8 canali fisici, caratterizzati da differenti timeslot ma dallo stesso valore della frequenza portante. Infatti, com'è noto, ad una MS possono essere allocati diversi canali di traffico in uplink e in downlink (detti rispettivamente PDTCH/U e PDTCH/D), i primi per comunicazioni originate dalla MS, gli altri per comunicazioni terminate sulla MS. Ogni PDTCH in una stessa direzione interessa un diverso timeslot, quindi la trasmissione o la ricezione di dati sui diversi canali avvengono in istanti diversi; è però possibile avere sovrapposizione temporale tra la trasmissione su un canale in uplink e la ricezione su uno in downlink. Solo in questo modo infatti si possono sfruttare tutti i canali disponibili.

Tuttavia, non tutti i terminali mobili supportano questa funzionalità. In particolare, lo standard GPRS definisce due classi: i terminali di tipo 1 non sono in grado di trasmettere e ricevere dati simultaneamente, quindi il numero di slot utilizzabili è limitato; i terminali di tipo 2 supportano invece trasmissione e ricezione simultanee, e possono quindi sfruttare un numero maggiore di slot.

Sono inoltre definite 29 classi multi-slot, elencate in Tabella 6.3, ognuna delle quali caratterizzata da differenti parametri riguardanti il

Classe	Rx	Tx	Somma	Tn
1	1	1	2	4
2	2	1	3	3
3	2	2	4	3
4	3	1	4	3
5	2	2	4	3
6	3	2	4	3
7	3	3	4	3
8	4	1	5	2
9	3	2	5	2
10	4	2	5	2
11	4	3	5	2
12	4	4	5	2
13	3	3	NA	3
14	4	4	NA	3
15	5	5	NA	3
16	6	6	NA	2
17	7	7	NA	1
18	8	8	NA	0
19	6	2	NA	2
20	6	3	NA	2
21	6	4	NA	2
22	6	4	NA	2
23	6	6	NA	2
24	8	2	NA	2
25	8	3	NA	2
26	8	4	NA	2
27	8	4	NA	2
28	8	6	NA	2
29	8	8	NA	2

Tabella 6.3. Classi multi-slot

numero di slot utilizzabili. In particolare, per ogni classe sono specificati:

- il numero massimo di slot utilizzabili per la ricezione (*Rx*);
- il numero massimo di slot utilizzabili dalla MS per la trasmissione (*Tx*);
- il numero massimo di slot utilizzabili in totale per trasmissione e ricezione (*Somma*);
- il numero minimo di slot richiesti per la misura della potenza sui canali adiacenti (*Tn*).

Ad esempio, un terminale di classe 7 può al massimo trasmettere dati su 3 timeslot e riceverne su 1, trasmettere su 2 e ricevere su 2, oppure trasmettere su 1 e ricevere su 3: in ogni caso, il numero totale di timeslot utilizzati in parallelo non può essere superiore a 4, anche se naturalmente può essere inferiore.

Le classi da 13 a 29 possono essere supportate unicamente da terminali di tipo 2.

6.5 Codifica di canale

La codifica di canale ha lo scopo di proteggere da eventuali errori i pacchetti di dati trasmessi, consentendo di rivelare ed eventualmente correggere gli errori. La tecnica di codifica utilizzata nel GPRS è abbastanza simile a quella impiegata nel GSM: ogni pacchetto di dati proveniente dallo strato RLC/MAC (v. Figura 5.9) subisce prima una codifica a blocchi, poi una codifica convoluzionale. Infine, ogni blocco è mappato in modo interlacciato su quattro burst, che, come si è detto, costituiscono un radio block.

Ogni pacchetto dello strato RLC/MAC è costituito da un header MAC di 8 bit, 3 dei quali rivestono particolare importanza in quanto trasportano l'USF, da un header RLC di 16 bit, e da un numero di bit di dati dello strato LLC variabile a seconda dello schema di codifica.

Nel GPRS sono infatti definiti quattro diversi schemi di codifica (*Coding Scheme*, CS) con differenti tassi di codifica, i cui parametri sono elencati in Tabella 6.4. Lo schema CS-1 offre il livello di protezione più elevato (quindi la minore probabilità di errore) a prezzo di un minore throughput; gli schemi successivi offrono velocità di trasmissione via via più elevate ma riducono il livello di protezione dei dati, aumentando la probabilità di errore.

Schema	Bit di parità per l'USF	Bit di dati non codificati	BCS	Codifica convoluzionale	Bit eliminati (*punctured*)	Velocità di informazione netta per timeslot (kbit/s)
CS-1	0	160	40	Tasso 1/2	0	8
CS-2	3	240	16	Tasso 1/2	132	12
CS-3	3	288	16	Tasso 1/2	220	14.4
CS-4	9	400	16	No	0	20

Tabella 6.4. Schemi di codifica

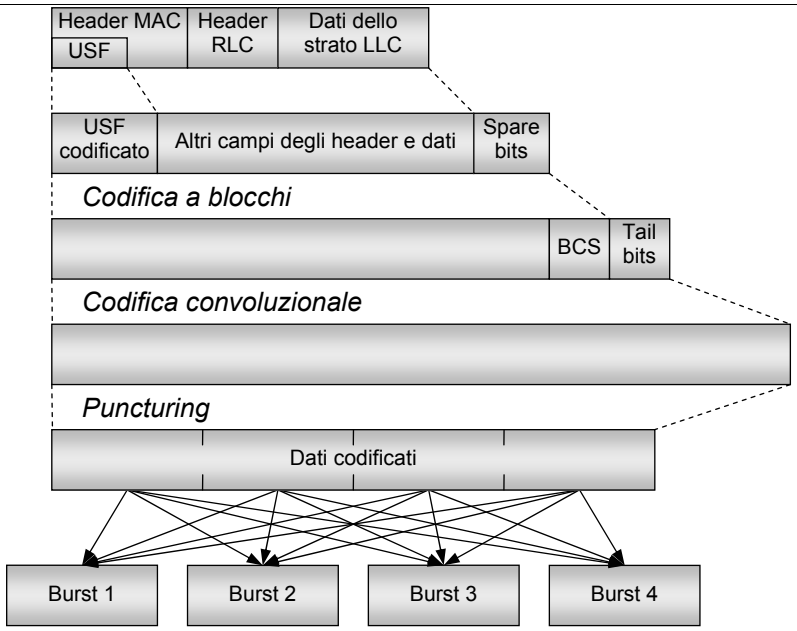

Figura 6.3. Codifica di canale

In ogni caso, come mostra la Figura 6.3 (non in scala), in un primo momento si effettua (tranne per lo schema CS-1) una precodifica dell'USF, aggiungendo ai 3 bit dell'USF 3 bit di parità per il CS-2 e il CS-3 o 9 bit per il CS-4. In seguito, al blocco costituito dall'USF codificato, dagli altri campi degli header RLC/MAC e dai dati dello strato LLC si aggiunge un certo numero (rispettivamente 0, 7, 3 o 7, sempre a seconda dello schema di codifica) di bit vuoti (*spare bits*). Il pacchetto così ottenuto viene inviato ad un codificatore a blocchi sistematico, che aggiunge un gruppo di bit di parità denominato BCS (*Block Check Sequence*). Se lo schema di codifica scelto era il CS-4, sui dati non si effettuano ulteriori operazioni; altrimenti, vengono aggiunti 4 bit di coda (*tail bits*), aventi tutti il valore logico 0, necessari per la successiva codifica convoluzionale. Questa avviene mediante un codificatore convoluzionale non sistematico di tasso 1/2 con memoria di 4 bit, definito dai generatori

$$G_0(D) = 1 + D^3 + D^4$$

$$G_1(D) = 1 + D + D^3 + D^4$$

All'uscita del codificatore convoluzionale, se lo schema scelto era il CS-2 o il CS-3, vengono eliminati mediante traforazione (*puncturing*) rispettivamente 132 o 220 bit. In questo modo, come si può vedere dalla Figura 6.4, con qualsiasi schema si generano blocchi di 456 bit, pari alla capacità massima di un radio block. Ognuno di questi blocchi è poi suddiviso in quattro parti da 114 bit, ciascuna delle quali viene mappata in modo interlacciato, insieme a parti provenienti da altri blocchi, su quattro burst normali (v. par. 6.7), i quali, come si è detto, costituiscono un radio block.

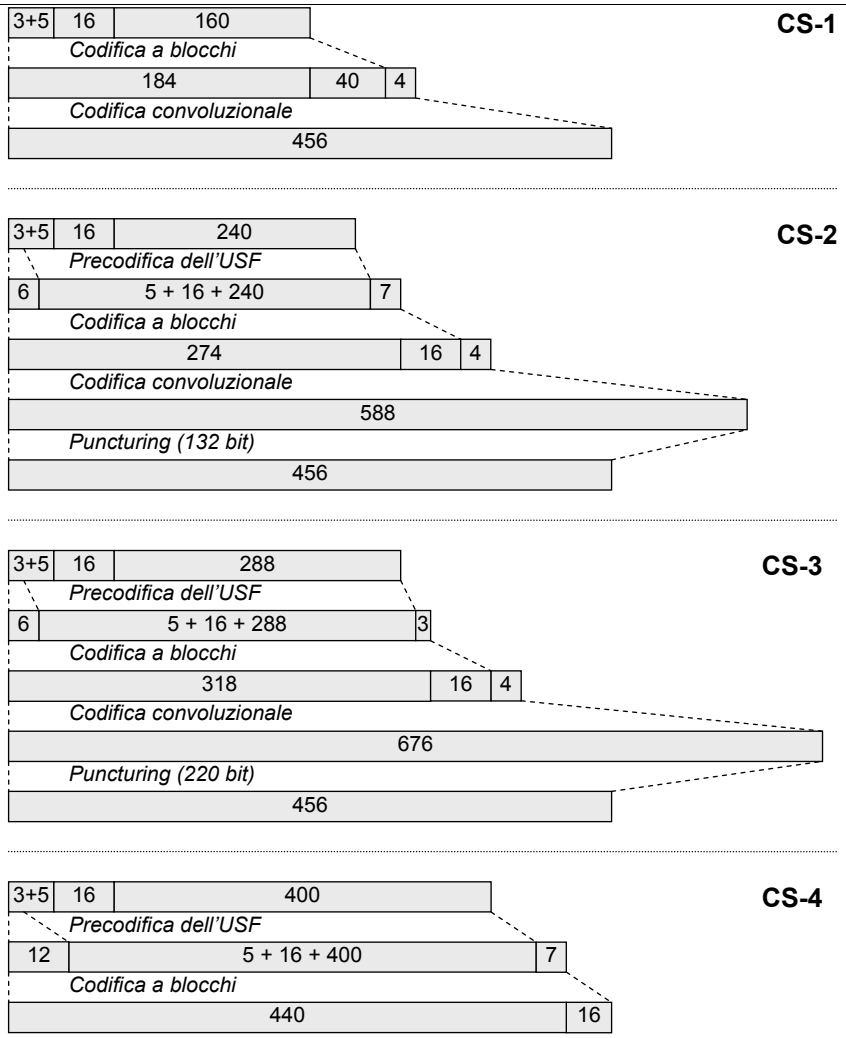

Figura 6.4. Schemi di codifica

Evidentemente, a seconda dello schema di codifica scelto, varia la velocità di informazione. Infatti, mentre col CS-1 si riescono a trasmettere solo 160 bit di informazione[10] in ogni radio block, col CS-4 i bit trasmissibili sono ben 400. Come è noto, nel sistema GSM/GPRS ogni trama TDMA ha una durata di 4.615 ms circa; perciò la durata di una struttura da 54 trame è di 240 ms. Ognuna di queste strutture comprende 12 radio block, dunque la durata di ogni radio block è di 20 ms[11].

Ogni 20 ms, perciò, a seconda dello schema di codifica, vengono trasmessi rispettivamente 160, 240, 288 o 400 bit di informazione. Le velocità di informazione

[10] Si considereranno come bit di informazione i blocchi passati dallo strato LLC allo strato RLC. Detti blocchi conterranno anche bit appartenenti agli header dei protocolli superiori, la cui entità dipende dai protocolli stessi e non può quindi essere tenuta in conto.

[11] Si noti che tale durata è superiore al quadruplo della durata di una trama, a causa della presenza, in ogni struttura multitrama, dei 2 blocchi di sincronizzazione e dei 2 blocchi inutilizzati.

nette risultanti sono dunque di 8, 12, 14.4 e 20 kbit/s. Se si considerano anche gli header dei protocolli RLC e MAC (escludendo l'USF), si trova, per lo schema CS-4, una velocità di 21.4 kbit/s, comunemente indicata come la massima velocità di trasmissione consentita dal GPRS per ogni timeslot. Ricordando poi che esiste la possibilità (teorica) di allocare fino a 8 timeslot ad un singolo utente, si trova che la velocità massima raggiungibile è di 171.2 kbit/s (o 160 kbit/s se si considerano solo i bit di informazione).

Si noti che, in qualsiasi caso, all'interfaccia fisica devono essere trasmessi 456 bit ogni 20 ms, quindi la velocità di trasmissione lorda è sempre di 22.8 kbit/s.

I canali di segnalazione sono tutti codificati utilizzando lo schema CS-1, ad eccezione del PRACH, che può trasmettere burst con 8 o 11 bit di informazione.

Per la codifica del canale utilizzato per trasmettere i dati di utente (PDTCH) è possibile scegliere di volta in volta lo schema di codifica a seconda della qualità del segnale. Per indicare quale schema si sta utilizzando vengono adoperati i due *stealing flag* contenuti in ogni burst. Se le condizioni del canale sono molto sfavorevoli, è possibile ottenere una codifica affidabile a prezzo di una riduzione della velocità di trasmissione scegliendo lo schema CS-1. Al contrario, in condizioni ottimali lo schema CS-4 consente di raggiungere le maggiori velocità.

In generale, tuttavia, lo stesso timeslot può essere condiviso tra vari utenti, la qualità del canale non è sempre tale da consentire l'uso dello schema CS-4, l'uso contemporaneo di 8 timeslot e/o del CS-4 può non essere consentito dalla MS o dal gestore; a causa di queste difficoltà, la velocità reale del collegamento varia generalmente tra 10 e 50 kbit/s.

Dopo la codifica, in ogni caso, le parole di codice vengono interlacciate con profondità 4, ovvero uno stesso blocco di dati viene diviso in 4 parti e trasmesso (insieme a parti derivanti da altri blocchi) su 4 burst. In questo modo si aumenta la probabilità che eventuali errori di trasmissione coinvolgano pochi bit di ogni blocco anziché diversi bit di uno stesso blocco, agevolando il processo di correzione degli errori.

Al ricevitore, le parole di codice vengono de-interlacciate e decodificate sfruttando l'algoritmo di Viterbi.

6.6 Formato di modulazione

Il formato di modulazione usato dal GPRS è lo stesso già in uso per il GSM, ovvero il GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Questo formato è caratterizzato da uno spettro di potenza piuttosto stretto, qualità che consente di ottenere una bassa interferenza coi canali adiacenti. Un altro vantaggio di tale formato è di presentare un inviluppo di ampiezza costante, il che consente di utilizzare amplificatori non dotati di particolari caratteristiche di linearità, quindi semplici, poco costosi e con bassa richiesta di energia.

Il passaggio dai bit da trasmettere al segnale effettivamente trasmesso comprende vari stadi, mostrati in Figura 6.5.

Figura 6.5. Stadi del processo di modulazione

I bit di dati d_i subiscono dapprima una codifica differenziale:

$$\hat{d}_i = (d_i + d_{i-1}) \bmod 2, \quad d_i \in (0,1)$$

Quindi viene creata una sequenza di impulsi bipolari:

$$a_i = 1 - 2\hat{d}_i$$

$$\begin{cases} a_i = +1 \Leftrightarrow \hat{d}_i = 0 \\ a_i = -1 \Leftrightarrow \hat{d}_i = 1 \end{cases}$$

Questa sequenza è inviata al filtro di trasmissione, che genera il segnale modulante *y(t)*. La risposta impulsiva *g(t)* di questo filtro è definita dalla convoluzione della risposta impulsiva *h(t)* di un filtro gaussiano passabasso con un rettangolo:

$$g(t) = h(t) \otimes \mathrm{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma T} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2 T^2}\right), \quad \sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi BT}, \quad BT = 0.3$$

$$\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} \frac{1}{T} & |t| < \frac{T}{2} \\ 0 & |t| \geq \frac{T}{2} \end{cases}$$

Nelle formule suddette *B* è la banda a 3 dB del filtro *h(t)* e *T* è la durata di un bit in ingresso. Nel GSM/GPRS, il prodotto *BT*, che indica la larghezza di banda relativa del filtro gaussiano, è stato posto pari a 0.3. La risposta impulsiva *h(t)* e la risposta in frequenza *H(f)* del filtro gaussiano sono mostrate in Figura 6.6 e 6.7, mentre la Figura 6.8 mostra la risposta impulsiva *g(t)* del filtro di trasmissione risultante dalla convoluzione di *h(t)* col rettangolo.

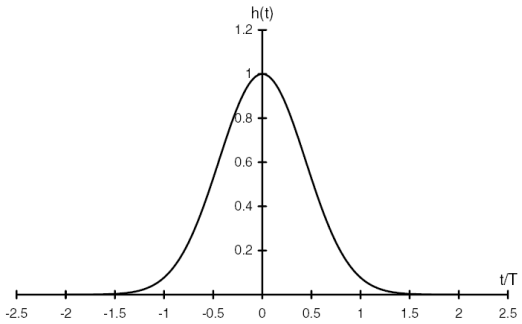

Figura 6.6. Risposta impulsiva del filtro gaussiano

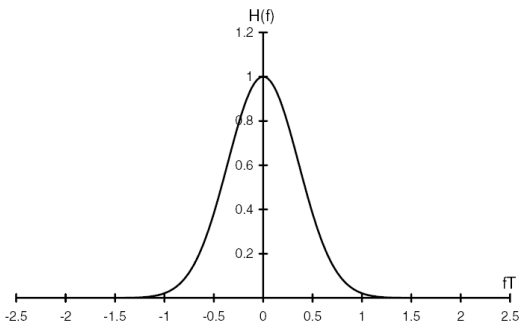

Figura 6.7. Risposta in frequenza del filtro gaussiano

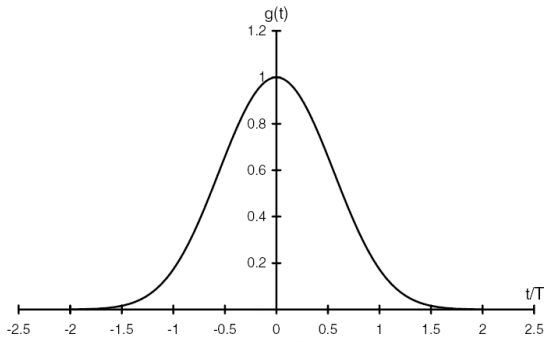

Figura 6.8. Risposta impulsiva del filtro di trasmissione

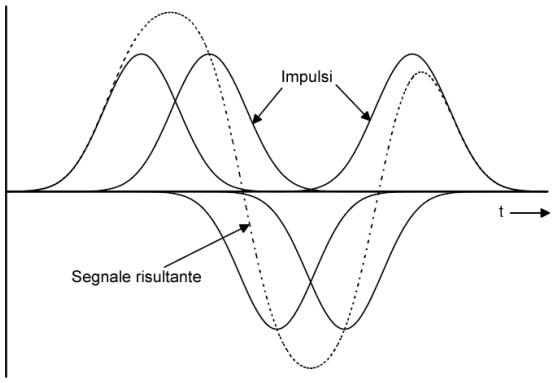

Figura 6.9. Segnale modulante

Il segnale all'uscita del filtro di trasmissione è la somma delle risposte del filtro stesso alla sequenza di impulsi all'ingresso, come mostrato in Figura 6.9 nel caso in cui la sequenza di ingresso sia 11001. Questo segnale viene poi usato per modulare la frequenza della portante.

In pratica, la modulazione utilizzata corrisponde a una *Minimum Shift Keying* (MSK) in cui il segnale in ingresso, prima della *Continuous Phase Modulation* (CPM), venga fatto passare attraverso un filtro gaussiano passabasso. Per questo motivo, tale modulazione è detta *Gaussian MSK* (GMSK). Il filtraggio col filtro gaussiano ha l'effetto di smussare la risposta impulsiva *g(t)*, ma anche di allargarla. Ciò significa che da una parte la densità spettrale di potenza del segnale si restringe, ma dall'altra, a causa della maggiore durata delle risposte impulsive, aumenta l'interferenza intersimbolica, che dovrà essere compensata al ricevitore per mezzo di un equalizzatore.

Analiticamente, il segnale modulante *y(t)* è la convoluzione della risposta impulsiva *g(t)* del suddetto filtro con la sequenza di impulsi di Dirac a_i derivanti dal flusso di dati in ingresso:

$$y(t) = \sum_i a_i g(t - iT)$$

Il segnale *y(t)* viene quindi inviato a un modulatore di fase. Il segnale modulato può essere rappresentato dall'espressione

$$x(t) = \sqrt{\frac{2E_c}{T}} \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi\eta \int_{-\infty}^{t} y(\tau)\mathrm{d}\tau + \varphi_0 \right)$$

dove E_c è l'energia media per bit, f_0 la frequenza della portante, e φ_0 è uno sfasamento che si suppone costante per l'intera durata del burst.

Lo standard GSM/GPRS prevede che l'indice di modulazione η sia posto pari a 1/2; la massima variazione di fase tra due intervalli di bit successivi è dunque di $\pi/2$. Di conseguenza, il formato di modulazione del GSM (e del GPRS) è detto 0.3-GMSK con variazione di fase $\pi/2$.

6.7 Accesso multiplo

Analogamente al GSM, la tecnica di accesso multiplo del GPRS si basa su una combinazione di *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) e *Time Division Multiple Access* (TDMA).

Le frequenze riservate per il GPRS sono le stesse in uso nel GSM, ovvero la banda di 25 MHz di ampiezza tra gli 890 e i 915 MHz per la trasmissione dalla stazione mobile alla stazione base (*uplink*) e quella da 935 a 960 MHz per la trasmissione nel senso inverso (*downlink*). Ognuna di queste bande è suddivisa in 124 canali con ampiezza di 200 kHz ciascuno, più 200 kHz usati come banda di guardia. Questi canali vengono suddivisi tra i vari gestori che operano nella stessa zona. Ogni gestore, poi, alloca un sottoinsieme dei canali a lui riservati per ogni stazione base, cioè per ogni cella, scelti in modo tale da evitare interferenze tra celle che utilizzano gli stessi canali. Uno dei canali di ogni cella viene utilizzato per trasmettere dati di sincronismo e di controllo diretti a tutte le MS presenti in quella cella (*Broadcast Control Channel*, BCCH), gli altri sono usati per lo scambio di messaggi (voce o dati) con le MS.

Ognuno di questi canali FDMA viene suddiviso in timeslot, che sono poi raggruppati a 8 a 8, trasportando così 8 canali TDMA; l'insieme degli 8 timeslot costituisce una trama TDMA. Mentre nel GSM ad ogni utente è assegnato un timeslot in uno dei canali di uplink e uno in un canale di downlink per l'intera durata della comunicazione, il GPRS, come si è detto, consente l'assegnazione dinamica dei timeslot agli utenti che ne fanno richiesta (*capacity on demand*).

Ogni timeslot di una trama TDMA ha una durata di 15/26 ms ≈ 0.577 ms e contiene 156.25 periodi di bit; una trama TDMA dura quindi 60/13 ms ≈ 4.615 ms. Durante i periodi in cui uno slot è assegnato ad un utente, la velocità di trasmissione (lorda) è dunque di circa 271 kbit/s. Siccome però non tutti i bit che vengono trasmessi trasportano dati di utente, e siccome uno stesso utente non ha quasi mai la disponibilità di tutti e 8 i timeslot di ogni trama, la velocità netta reale è decisamente inferiore.

Ogni slot di una trama TDMA può contenere un burst di dati; esistono 5 tipi di burst (v. Figura 6.10):

- Il ***Normal Burst*** (NB) è utilizzato per la trasmissione dei dati di utente codificati e protetti e dei messaggi di controllo. Oltre a due blocchi da 57 bit ciascuno contenenti dati di utente o di segnalazione, tale burst trasporta diversi altri dati. All'inizio e alla fine di ogni burst ci sono 3 bit di coda, aventi sempre il valore logico 0, che hanno la funzione di occupare i brevi periodi di tempo durante i quali il trasmettitore viene acceso o spento e la trasmissione di dati è impossibile a causa della

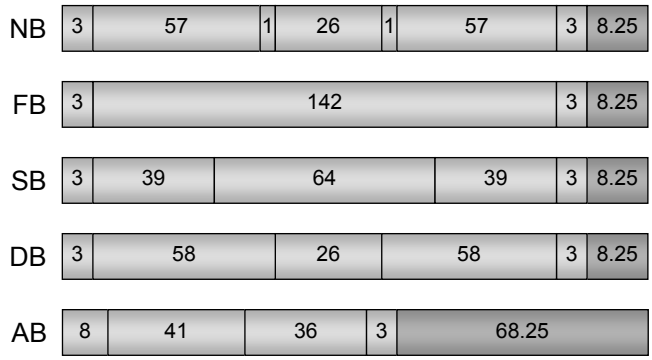

Figura 6.10. Tipi di burst

presenza di rampe di salita o di discesa. I due *Stealing Flag* (SF)[12] sono bit di controllo usati per indicare quale schema di codifica si sta utilizzando tra i quattro possibili. Il midambolo è costituito da una sequenza di 26 bit predefiniti (*training sequence*), noti sia al trasmettitore che al ricevitore, utilizzati per eseguire una stima del canale in modo da poterne ridurre gli effetti: al ricevitore, con l'aiuto di questi bit, l'equalizzatore effettua una stima del filtraggio introdotto dal canale e crea il filtro inverso, col quale poi vengono filtrati i dati ricevuti. Sono definite otto diverse sequenze, ciascuna identificata da un *Training Sequence Code* (TSC); contestualmente all'assegnazione di un canale, la rete comunica alla MS quale training sequence utilizzare. Infine, è presente un periodo di guardia di 8.25 periodi di bit che compensa le variazioni del ritardo di trasmissione dei pacchetti dovute a variazioni della distanza tra MS e BSS.

- Il ***Frequency correction Burst*** (FB) è utilizzato per la sincronizzazione della frequenza di lavoro di una MS. In esso, tutti i bit sono posti al valore logico 0. A causa del particolare formato di modulazione del GSM/GPRS, ciò corrisponde alla trasmissione di una sinusoide non modulata a una frequenza che supera di 1625/24 kHz ≈ 67.7 kHz la frequenza nominale della portante. Questo segnale è trasmesso periodicamente dalla stazione base sul BCCH, permettendo alla stazione mobile di sincronizzarsi esattamente alla frequenza della portante. La trasmissione ripetuta del FB costituisce il *Frequency Correction Channel* (FCCH).
- Il ***Synchronization Burst*** (SB) è usato per trasmettere informazioni che consentono alla MS la sincronizzazione temporale con la BTS. Oltre al midambolo, questo burst contiene il numero della trama TDMA corrente, il *Reduced TDMA Frame Number* (RFN) e il *Base transceiver Station Identity Code* (BSIC). La trasmissione ripetuta del SB costituisce il *Synchronization Channel* (SCH).
- Il ***Dummy Burst*** (DB) è trasmesso sul BCCH quando non ci sono altri burst da trasmettere. In questo modo si assicura che tale canale trasmetta un burst in ogni timeslot, permettendo alle MS di misurare in ogni momento la potenza del segnale sul BCCH.
- L'***Access Burst*** (AB) viene usato per effettuare un accesso arbitrario al RACH/PRACH, senza sincronizzazione. Il periodo di guardia di questo burst è notevolmente superiore agli altri per ridurre la probabilità di collisioni: a causa della mancata sincronizzazione adattativa (v. par. 6.9), infatti, c'è la possibilità che un burst si sovrapponga a un altro trasmesso da una diversa MS nel timeslot successivo. Per ridurre tale rischio, l'access burst prevede un periodo di guardia di 68.25 periodi di bit, corrispondenti a 252 μs, che permette alla MS di trovarsi in un raggio di 38 km dalla BTS senza che il burst emesso venga ricevuto nel timeslot adiacente.

Come spiegato nel paragrafo 6.5, tutti i messaggi generati dallo strato MAC, contenenti sia dati di utente che informazioni di segnalazione, sono trasferiti all'interfaccia fisica come sequenze di quattro burst normali, costituenti un unico blocco

[12] Il loro nome deriva dal fatto che nel GSM vengono usati per indicare se il pacchetto contiene dati di utente o se è stato "rubato" (*stolen*) da un canale di controllo.

radio. L'unico canale a costituire un'eccezione è il PRACH, i cui messaggi vengono trasferiti utilizzando un solo access burst per ogni messaggio.

6.8 Controllo della potenza

Le funzioni relative al controllo della potenza hanno lo scopo di minimizzare la potenza trasmessa dalla MS e dal BSS senza inficiare la qualità del collegamento radio. In questo modo si prolunga la durata delle batterie della MS e si riduce l'interferenza co-canale tra comunicazioni che avvengono sulle stesse frequenze in celle vicine.

Per i servizi a commutazione di circuito, in genere il controllo del livello di potenza è demandato interamente alla stazione base, la quale, durante la chiamata, provvede a comunicare alla MS eventuali richieste di variazione della potenza da questa emessa. Nel caso del GPRS, invece, la trasmissione dei dati è discontinua, quindi una simile procedura non è attuabile. Il controllo della potenza emessa dalla MS deve perciò essere effettuato dalla MS stessa.

La MS deve calcolare la potenza da utilizzare in ogni canale dati in uplink. Tale potenza deve essere sempre la minima necessaria a garantire la qualità del servizio richiesta; l'unica eccezione è la trasmissione dell'access burst, che viene effettuata alla massima potenza. La potenza in uscita è calcolata dalla MS mediante specifici parametri di controllo fissati dalla rete, che dipendono dalla massima potenza permessa in una cella, dalla classe di potenza della MS e dall'intensità del segnale al ricevitore.

La formula utilizzata dal mobile per determinare la minima potenza in uplink (in dBm) è la seguente:

$$P_{ch} = \min\{(\tau_0 - \tau_{ch} - (\alpha \cdot (C + 48))), P_{max}\}$$

Di seguito viene precisato il significato dei simboli che compaiono nella precedente equazione.

- τ_0 è un parametro fissato dallo standard, che, per il GSM operante sulla banda dei 900 MHz, vale 39 dBm.
- τ_{ch} è un parametro inviato dal BSS alla MS all'interno dei messaggi di controllo RLC, e modificabile dinamicamente in qualsiasi momento da parte della rete, in 31 passi da 2 dB ciascuno. L'elemento più importante per il calcolo di τ_{ch} è la stima della potenza di interferenza, che viene effettuata dalla BTS misurando la potenza ricevuta negli intervalli di tempo riservati alla trasmissione delle 2 trame vuote della struttura multitrama. Grazie alla conoscenza di questo parametro, il calcolo della potenza trasmessa dalla MS può basarsi non solo sulla potenza del segnale da questa ricevuto, ma anche sulla potenza dell'interferenza sul canale di uplink, ovvero sulla qualità del canale di uplink. Da ciò deriva l'importanza del parametro τ_{ch}.
- C indica la potenza media del segnale ricevuto dalla MS, calcolata utilizzando il controllo di potenza in downlink relativo al PBCCH.
- α, che può variare tra 0 e 1 in passi da 0.1, ha la funzione di dare al fattore per cui viene moltiplicato un peso stabilito dalla rete.

- P_{max} è la massima potenza consentita dalla cella per il segnale in uscita.

6.9 Sincronizzazione adattativa

Un terminale mobile che necessiti di scambiare dati con la rete GPRS può trovarsi in un punto qualsiasi all'interno della cella; la distanza tra MS e BTS può quindi variare, causando la variazione del tempo di propagazione del segnale. Il burst ricevuto dalla stazione base può dunque essere sfasato rispetto al corrispondente timeslot, causando il rischio di sovrapposizioni coi burst trasmessi da altre MS. Il sistema GPRS, essendo basato sulla sincronizzazione esatta dei burst trasmessi e ricevuti, non può tollerare tali variazioni. L'unico metodo per evitarle è di anticipare l'inizio della trasmissione di un burst da parte della MS in proporzione alla sua distanza dalla BTS. La procedura di sincronizzazione dell'istante di trasmissione delle trame prende il nome di sincronizzazione adattativa della trama. Tale procedura, evidentemente, non è necessaria unicamente nel sistema GPRS, ma era già prevista nel GSM standard. Tuttavia, con l'introduzione del servizio a commutazione di pacchetto, l'implementazione della procedura di sincronizzazione adattativa è notevolmente più complicata.

Com'è noto, la differenza principale tra le reti a commutazione di circuito e quelle a commutazione di pacchetto è che in queste ultime la trasmissione non è continua. Nel caso della commutazione di circuito, siccome la stazione mobile trasmette dati con continuità, la BTS può facilmente misurare il ritardo di trasmissione rispetto a una precedente sincronizzazione. Dall'entità di tale ritardo è possibile poi calcolare l'anticipo di sincronizzazione (*Timing Advance*, TA), ovvero l'anticipo dell'inizio della trasmissione di un burst rispetto all'istante di inizio nominale dello slot, necessario perché la trasmissione di un burst avvenga esattamente nel timeslot assegnato alla MS, senza disturbare le trasmissioni nei timeslot adiacenti. Questa operazione sarebbe estremamente difficile nel caso di trasmissione a pacchetto, dato che l'intervallo temporale tra la trasmissione di due pacchetti può essere notevole. Per sincronizzare correttamente i burst ed evitare interferenze tra diversi timeslot è quindi necessaria una nuova tecnica, divisa in due fasi.

Dapprima, così come avviene per i servizi a commutazione di circuito, la stazione base misura il ritardo della ricezione della richiesta di accesso effettuata dalla MS sul PRACH/RACH. In seguito, la misura del ritardo avviene con continuità sfruttando il PTCCH. Come si è detto, il PTCCH è trasportato dagli slot di sincronizzazione delle strutture multitrama (v. par. 6.3). Ogni struttura comprende due slot dedicati alla sincronizzazione, ovvero trasferisce due canali PTCCH. Per le operazioni di sincronizzazione, si definiscono gruppi di 8 strutture multitrama, che corrispondono a 16 canali logici PTCCH. Ad ogni PTCCH, considerato ora come un sottocanale, è assegnato un valore detto TAI (*Timing Advance Index*) da 0 a 15. Nel messaggio di assegnazione della risorsa, alla MS è assegnato anche uno di questi sottocanali, identificato da un certo valore del TAI. La MS trasmetterà un access burst ad ogni occorrenza del sottocanale assegnato, cioè una volta ogni 8 strutture multitrama. La stazione base, alla ricezione del burst, calcola il ritardo di trasmissione e il nuovo valore dell'anticipo di sincronizzazione. Questo valore viene poi comunicato alla MS mediante

il canale PTCCH in downlink. Il messaggio di TA inviato dalla stazione base contiene i valori degli anticipi di sincronizzazione relativi a tutti e 16 i TAI del gruppo; la sua trasmissione richiede 4 burst, quindi la MS riceve un messaggio di TA ogni 2 strutture multitrama. Mediante questo processo, la MS può aggiornare il valore dell'anticipo di sincronizzazione ogni 8 strutture multitrama, cioè ogni 2 secondi circa.

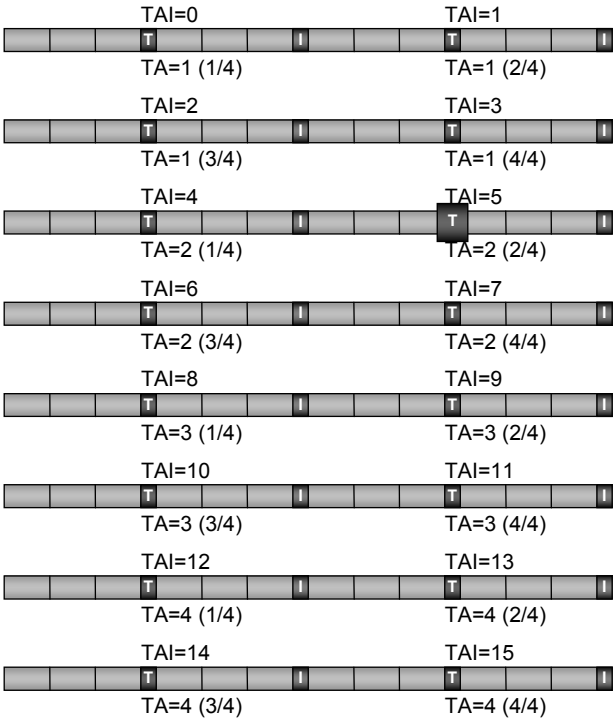

Figura 6.11. Esempio di sincronizzazione adattativa

In Figura 6.11 è mostrato un esempio di questo processo. In questo caso, si è supposto che alla MS sia stato assegnato il TAI n. 5. La MS in questione trasmetterà perciò il proprio access burst nel secondo slot di sincronizzazione della terza struttura multitrama. La corrispondente risposta, contenente il valore aggiornato del TA, sarà ricevuta nel messaggio di TA n. 3. Lo stesso valore del TA sarà ripetuto in tutti i successivi messaggi di TA finché la MS non invierà un nuovo access burst nel TAI n. 5 del successivo gruppo di 8 strutture multitrama.

6.10 Trasmissione di pacchetti di dati

In questo paragrafo vengono esaminate le procedure necessarie per trasmettere pacchetti di dati sull'interfaccia fisica, sia in uplink (dalla MS al BSS) che in downlink (dal BSS alla MS).

6.10.1 Trasmissione in uplink

La Figura 6.12 schematizza il processo di trasmissione dei dati da una MS al BSS che la sta servendo in quel momento.

Prima di iniziare il trasferimento dei pacchetti di dati verso il BSS, la MS deve richiedere l'assegnazione di un canale PDTCH in uplink. Per effettuare la richiesta, la MS invia al BSS un messaggio di PACKET CHANNEL REQUEST mediante il PRACH o il RACH. Questo canale è condiviso tra tutte le MS presenti in una stessa cella: c'è quindi la possibilità di collisioni tra le richieste di accesso provenienti da terminali diversi. In questo caso (come nel caso, molto meno probabile, di rapporto segnale/rumore eccessivamente basso) il BSS non riesce a decodificare il messaggio, che viene quindi scartato. Se la MS non riceve risposta alla richiesta di assegnazione delle risorse entro un tempo predefinito, suppone che sia avvenuta una collisione e ritenta l'accesso; per

evitare collisioni reiterate, il tempo di attesa prima della ritrasmissione è scelto in modo casuale. Qualora invece il messaggio venga ricevuto correttamente, il BSS risponde utilizzando rispettivamente il PAGCH o l'equivalente canale GSM, detto AGCH. È possibile utilizzare un metodo di accesso in una fase o in due fasi. Le frecce tratteggiate in Figura 6.12 rappresentano le operazioni aggiuntive richieste dal metodo di accesso in due fasi.

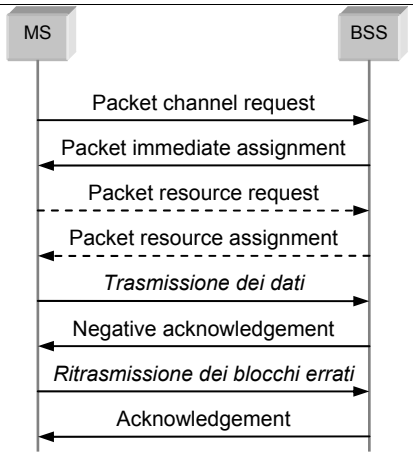

Figura 6.12. Trasmissione in uplink

Nel metodo di accesso in una fase, il BSS riserva le risorse necessarie per il trasferimento di un certo numero di pacchetti e risponde alla richiesta di assegnazione del canale con un messaggio di PACKET IMMEDIATE ASSIGNMENT, in cui vengono specificate le risorse assegnate alla MS. Se il messaggio di richiesta è inviato attraverso il RACH, la MS può scegliere solamente se richiedere una determinata quantità di risorse oppure un accesso in due fasi; invece, mediante il PRACH, il messaggio di richiesta può contenere altre informazioni, quali classe multi-slot, livello di precedenza, numero di blocchi richiesti, ecc. In ogni caso, per ridurre la probabilità di collisione nelle procedure di accesso casuale, le dimensioni del messaggio di PACKET CHANNEL REQUEST devono essere limitate, dunque non è possibile specificare in dettaglio l'entità delle risorse necessarie: per questo motivo, è previsto il metodo di accesso in due fasi.

Se la MS richiede un accesso in due fasi, il BSS può rispondere ordinando di continuare la procedura di accesso in una fase oppure può accettare la richiesta. In questo caso, in un primo momento il BSS riserva unicamente le risorse necessarie alla trasmissione del successivo messaggio di PACKET RESOURCE REQUEST, mediante il quale la MS può descrivere in dettaglio le risorse necessarie al trasferimento dei dati (precisando anche le proprie caratteristiche, il motivo della richiesta, la potenza del segnale ricevuto e dell'interferenza su tutti i canali); in seguito, il BSS riserva le risorse opportune (non solo canali logici, ma anche buffer e identificativi) e ne informa la MS con un messaggio di PACKET RESOURCE ASSIGNMENT.

Il passo successivo per il trasferimento dei pacchetti di dati è l'allocazione dei canali radio. Come si è detto, per consentire un uso efficiente e flessibile delle risorse radio, è previsto che i pacchetti possano essere trasmessi in parallelo su diversi canali dati, e che la larghezza di banda dedicata ad ogni MS possa essere variata dinamicamente mediante allocazione di un numero variabile di timeslot della stessa trama TDMA. Sorge perciò la necessità di informare periodicamente la MS su quali canali può utilizzare per trasmettere i propri pacchetti. Sono stati definiti due meccanismi di allocazione delle risorse, l'allocazione dinamica e quella fissa.

- Il meccanismo di allocazione dinamica, schematizzato in Figura 6.13, prevede che in ogni messaggio di assegnazione di un canale in uplink inviato dalla rete alla MS sia contenuto l'elenco dei canali dati assegnati (timeslot e portanti) e dei corrispondenti valori dell'USF. La MS esamina gli USF dei canali dati allocati ed effettua la

trasmissione dei pacchetti solamente sui canali che trasportano un valore dell'USF riservato per l'uso da parte di quella MS. Mediante l'USF è possibile assegnare a una MS uno o quattro blocchi radio dei dodici che costituiscono una struttura multitrama. Quindi, quando la MS rileva un valore opportuno dell'USF in downlink, trasmette o un singolo blocco RLC o una sequenza di quattro blocchi. La MS include nei blocchi trasmessi in uplink il numero di blocchi residui relativamente a quel TBF. La rete continuerà ad assegnare risorse radio alla MS finché questa non segnalerà che non ci sono altri blocchi da trasmettere.

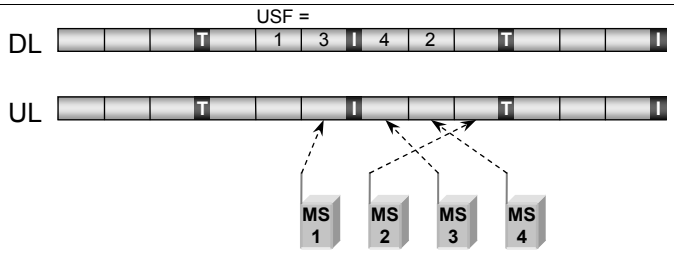

Figura 6.13. Allocazione dinamica

- Il meccanismo di allocazione fissa prevede che la rete assegni immediatamente alla MS tutte le risorse indicate nel messaggio di richiesta. Il messaggio di assegnazione delle risorse conterrà perciò le informazioni necessarie alla MS per la trasmissione di tutti i blocchi di dati. In particolare, tale messaggio includerà la frequenza assegnata, i timeslot, una mappa di dimensioni variabili da 1 a 127 bit e la posizione del primo blocco radio utilizzabile a partire dall'istante di ricezione del messaggio. Quando la MS riceve queste informazioni, inizia la trasmissione dei propri dati nei timeslot opportuni, a partire dal blocco indicato e utilizzando le informazioni presenti nella mappa in modo che ad ogni 0 corrisponda un blocco non assegnato e ad ogni 1 un blocco assegnato. Ad esempio, se alla MS sono assegnati i timeslot 2 e 6 a partire dal blocco 4 e con mappa 10011, questa trasmetterà i propri pacchetti nei blocchi evidenziati in Figura 6.14.

In ogni caso, dopo l'allocazione dei canali radio, può iniziare la trasmissione vera e propria. La MS invia perciò al BSS un numero di pacchetti dipendente dalle risorse radio disponibili e dalla dimensione della finestra di trasmissione. Il BSS invia quindi sul PACCH un messaggio di conferma (*acknowledgement*). Se la trasmissione è avvenuta correttamente, l'acknowledgement è positivo (ACK); in caso di errori, invece, il BSS invia un acknowledgement negativo (NACK) in cui vengono specificati i blocchi errati e vengono assegnate le opportune risorse per la ritrasmissione. A seguito della ricezione di un NACK, la MS effettua la ritrasmissione dei soli blocchi indicati come affetti da errori.

Se la MS non riceve un messaggio di ACK o NACK entro un certo tempo dall'invio dei dati, suppone che i pacchetti siano andati perduti; siccome però esiste la possibilità che i dati abbiano raggiunto la destinazione ma sia stato perduto solamente l'ACK/NACK, la MS non ritrasmette l'intera trama, ma esegue una procedura più raffinata. Tale procedura prevede che la MS richieda le risorse per la trasmissione di un solo blocco di dati, e, una volta ricevuta

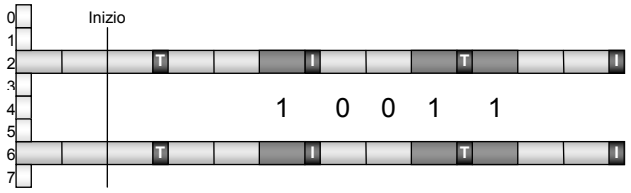

Figura 6.14. Allocazione fissa

l'autorizzazione, ritrasmetta solamente il primo blocco della trama. In questo modo, se la trama stessa è già stata ricevuta dal BSS, questo capisce che il corrispondente ACK/NACK è stato perso e lo trasmette nuovamente.

Per informare la rete della fine della trasmissione dei dati, la MS inserisce nell'header degli ultimi 16 blocchi RLC un valore decrescente da 15 a 0. Una volta che tale valore è arrivato a 0, la rete invia il messaggio finale di acknowledgement.

6.10.2 Trasmissione in downlink

La Figura 6.15 schematizza il processo di trasmissione dei dati da un BSS a una delle MS presenti nella sua area di traffico.

Prima di iniziare la trasmissione vera e propria, il BSS deve effettuare la ricerca della MS all'interno dell'area di traffico. Perciò, il BSS invia dapprima un messaggio di PACKET PAGING REQUEST sul PPCH o sul PCH. La MS risponde inviando rispettivamente sul PRACH o sul RACH un messaggio di PACKET CHANNEL REQUEST, in cui richiede le risorse necessarie all'invio del messaggio di PACKET PAGING RESPONSE; dopo che il BSS le ha assegnato le risorse richieste, la MS risponde al messaggio di ricerca. A questo punto, il BSS informa la MS sulla portante e sui timeslot che le sono stati assegnati, sull'anticipo di sincronizzazione, sulla potenza da trasmettere, sul numero della trama TDMA iniziale e sul TFI che è stato associato al flusso di dati diretto a quella MS. Ora può iniziare la trasmissione dei pacchetti.

Anche in questo caso, come per la trasmissione in uplink, è possibile multiplare flussi di dati destinati a diverse MS sullo stesso canale fisico: ogni blocco RLC contiene infatti, nell'header, il codice identificativo del flusso a cui appartiene, ovvero il TFI, grazie al quale ogni MS attiva può prelevare dall'insieme di pacchetti trasmessi in downlink quelli diretti ad essa. Viceversa, se sono disponibili diversi canali in downlink, e se la MS supporta tale funzionalità, e possibile trasferire in parallelo diversi blocchi diretti alla stessa MS. È anche possibile rallentare o interrompere il flusso di dati relativo a una MS per consentire l'invio di dati a precedenza maggiore o di messaggi di controllo urgenti.

Come nel caso della trasmissione in uplink, è previsto un sistema di acknowledgement positivi o negativi; se si verificano errori durante la trasmissione, vengono ritrasmessi solamente i blocchi indicati come errati nei messaggi di NACK. Inoltre, è possibile richiedere alla MS l'invio di un messaggio di acknowledgement dopo un determinato blocco.

Per informare la MS della fine della trasmissione dei dati, nell'header dell'ultimo blocco RLC è presente un *Final Block Indicator* (FBI); alla ricezione di questo blocco, la MS invia il messaggio finale di acknowledgement. La rete, ricevuto l'ACK, fa partire un timer, allo scadere del quale rilascia tutte le risorse precedentemente riservate per quella MS.

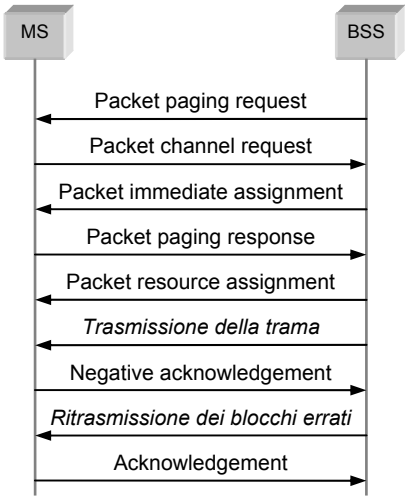

Figura 6.15. Trasmissione in downlink