

===== *IK2PIH* =====

APRS

Prestazioni e limiti

===== *23/07/2020* =====

Indice

<i>Nota dell'autore</i>	3
CAPITOLO 1 - Introduzione	4
1.1 Cos'è l'APRS	4
1.2 Digipeating APRS	4
1.3 Funzionamento della rete APRS radio	5
CAPITOLO 2 - Accesso al canale condiviso	7
2.1 frames APRS e capacità del canale trasmissivo	7
2.2 Prestazioni e limiti del protocollo ALOHA puro.....	8
2.3 CSMA: ascolta prima di trasmettere	11
CAPITOLO 3 - Reti APRS con un solo digipeater	13
3.1 Rete con un solo digipeater isofrequenza	13
3.2 Maggiore efficienza: un solo digipeater, più canali di uplink.....	17
3.3 Rete APRS con ripetitore analogico?	19
CAPITOLO 4 - Prestazioni e limiti della rete APRS attuale	20
4.1 Impatto di più digipeaters in una rete isofrequenza	20
4.2 Digipeating multiplo	23
CAPITOLO 5 - Nuovi assetti possibili	26
5.1 Premessa.....	26
5.2 Un intervento poco invasivo: aggiunta di un canale di ascolto.....	26
5.3 Maggiore efficienza: una rete articolata su due livelli gerarchici	27
5.4 IGATES: Ascolto diffuso e broadcasting su canali distinti.....	28
CONCLUSIONI	31
Bibliografia	32

E' garantito il permesso di copiare, distribuire e/o modificare questo documento seguendo i termini della Licenza per Documentazione Libera GNU, Versione 1.1 o ogni versione successiva pubblicata dalla Free Software Foundation.

Nota dell'autore

La rete APRS ha grandi potenzialità sulla carta: possibilità di tracciare le stazioni mobili, di inviare dati meteo, telemetria e messaggi, il tutto con la vecchia attrezzatura per il packet radio a 1200 baud AFSK, isofrequenza in tutta Europa a 144.800 MHz e quasi in tempo reale.

Praticamente tutti gli utenti, tuttavia, ne hanno sperimentato la difficoltà di utilizzo a causa della congestione che si verifica non appena un numero abbastanza limitato di stazioni attive invia report e messaggi.

Negli ultimi anni sono state messe in atto diverse strategie per migliorare le prestazioni della rete esistente, ottimizzando il protocollo di rete con l'introduzione di nuove regole (nuovo paradigma), invitando le stazioni a trasmettere con la minore frequenza possibile, scoraggiando l'uso del digipeating multiplo ed effettuando una razionalizzazione della distribuzione dei digipeaters sul territorio; manca tuttavia un'analisi quantitativa dell'efficienza dell'architettura del sistema che possa servire da guida per l'individuazione delle principali criticità e per la formulazione di proposte di riassetto coerenti.

Non aiuta la raccolta di statistiche sui pacchetti ricevuti e ritrasmessi dai digipeaters perché mancano le informazioni sulle collisioni, essenziali per la valutazione delle prestazioni.

Lo studio teorico della rete APRS è però purtroppo difficile per una serie di motivi, tra i quali la generazione del traffico non completamente casuale, la varietà e l'eterogeneità di hardware e software impiegati, la coesistenza di meccanismi diversi di accesso al canale condiviso, in parte CSMA e in parte ALOHA, il fenomeno di cattura tipico della modulazione FM (i segnali più forti oscurano i segnali più deboli), la rumorosità tipica del canale radio.

E' necessario operare pesanti semplificazioni per costruire un modello sufficientemente semplice da poter essere trattato con mezzi elementari; il modello proposto nelle pagine che seguono non ha la pretesa di descrivere con precisione il funzionamento della rete APRS ma vuole essere uno strumento utile a valutarne le prestazioni e i limiti e a formulare riflessioni su possibili nuovi assetti.

Contatti: Marco, IK2PIH, bermarco72@gmail.com

CAPITOLO 1 Introduzione

1.1 Cos'è l'APRS

L'APRS (Automatic Packet Reporting System) è un sistema di radiolocalizzazione sviluppato da un radioamatore, Bob Bruninga, nei primi anni novanta del secolo scorso.

Nasce come progetto sperimentale di ausilio alla protezione civile in accordo con gli obblighi/doveri del radioamatore di rendersi disponibile insieme al suo equipaggiamento in caso di insufficienza delle normali comunicazioni civili.

E' basato sulla trasmissione di segnali radio digitali a pacchetti (packet radio) e permette la diffusione di informazioni su posizione, velocità, direzione e status operativo di stazioni radioamatoriali, con la possibilità di visualizzare i dati in tempo reale su mappe sotto forma di icone. Consente anche l'invio di dati meteo, telemetria, informazioni su situazioni di emergenza (incidenti stradali, allerte civili e simili) e lo scambio di brevissimi messaggi di testo.

Per diffondere in modo efficiente le informazioni a tutte le stazioni in rete nonostante la ridotta velocità di comunicazione (1200 bps) utilizza un protocollo di tipo "uno a molti" su un unico canale radio in modalità non connessa (frames UI del protocollo AX.25) senza la certezza che il destinatario riceva ciò che è stato trasmesso.

La copertura della rete dipende dal numero di ripetitori digitali ("digipeaters") presenti sul territorio, che inoltrano automaticamente i segnali locali alle stazioni più lontane.

Inoltre, se in zona si trova una stazione IGATE di accesso ad internet, i segnali giungono anche sul web e sono visibili in tutto il mondo.

Le stazioni mobili, se munite di ricevitore GPS collegato alla radio, possono essere localizzate sulle mappe durante la loro marcia.

Per operare via radio è necessario un ricetrasmittitore sulla frequenza di 144 MHz (ma esistono frequenze destinate all'APRS anche in onde corte) collegato ad un PC con scheda audio o ad un TNC (modem) esterno; esistono in commercio ricetrasmittitori con TNC incorporato.

Per operare esclusivamente da internet (senza uso della ricetrasmittente) è sufficiente un PC o un telefonino con software apposito e una connessione ad internet.

E, naturalmente, è necessario un nominativo radioamatoriale valido, rilasciato previo superamento di un esame.

La ridotta velocità di trasmissione può causare congestione del traffico APRS sul canale radio se le stazioni sono troppo numerose e/o configurate con trasmissioni superflue o troppo frequenti. Chi opera in APRS via radio dovrebbe essere consapevole delle funzionalità e dei limiti del sistema. Se si accede via internet, invece, non si hanno queste limitazioni e in pochi secondi si ricevono dati da centinaia di stazioni ubicate in una vasta area attorno alla propria posizione.

1.2 Digipeating APRS

"Digipeater" è l'abbreviazione di "Digital Repeater"; un ripetitore per dati a pacchetti anziché per la voce. A differenza di un ripetitore vocale analogico standard, che riceve su una frequenza e ritrasmette tutto ciò che sente (informazione utile e rumore) simultaneamente su un'altra frequenza, il digipeater riceve un pacchetto di dati, lo registra in una memoria interna e poi, un attimo dopo, lo ritrasmette, rigenerato, solitamente sulla stessa frequenza.

La rigenerazione digitale del segnale ad ogni ripetizione è indispensabile: segnali non del tutto silenziosi, adeguati per la voce, possono non esserlo per la trasmissione dati; disturbi che non si notano nemmeno sulla voce potrebbero essere fatali per una trasmissione dati a pacchetti.

In generale i livelli di segnale adeguati per la voce non lo sono per i pacchetti di dati, perché nella trasmissione dati tutto un pacchetto deve essere ricevuto perfettamente per recuperare qualsiasi informazione in esso contenuta.

Questo è il motivo per cui nelle trasmissioni digitali si preferisce rigenerare i segnali tutte le volte che vengono ripetuti piuttosto che ripetere il segnale analogico che trasporta l'informazione digitale, anche se questo comporta un certo ritardo di propagazione dei segnali digitali attraverso catene di ripetitori.

Il digipeating inoltre è molto più critico per l'APRS che per il packet radio convenzionale perché l'APRS comporta la trasmissione di dati a pacchetti da e verso veicoli in movimento, mentre il packet radio convenzionale è utilizzato prevalentemente tra postazioni fisse, in genere con antenne migliori e maggiore potenza.

Con l'APRS inoltre non esiste un processo di handshaking: il mittente trasmette i pacchetti e spera che i destinatari li ricevano privi di errori. Le stazioni riceventi semplicemente ignorano i pacchetti difettosi. Questo è il prezzo da pagare per la natura di trasmissione uno-a-molti dell'APRS rispetto alla natura connessa del packet radio tradizionale.

Ogni trasmissione effettuata sul medesimo canale, infine, occupa non solo il tempo impiegato dall'utente originale per inviarlo, ma due, tre slot temporali aggiuntivi a seconda del numero di ritrasmissioni richieste. L'uso indiscriminato di tre, quattro o più ripetizioni può ridurre notevolmente la capacità del canale.

1.3 Funzionamento della rete APRS radio

La rete APRS è costituita da digipeaters ubicati in posizioni favorevoli (ampia copertura radio), operanti tutti sulla stessa frequenza e identificati da un nominativo radioamatoriale e da un "alias" generico, uguale per tutti i digipeaters.

Le stazioni terminali possono trasmettere i loro pacchetti APRS localmente, senza richiedere ripetizione da parte dei digipeaters (anche se ciò avviene raramente) oppure richiedere che il loro pacchetto venga ripetuto da uno o più digipeaters; in questo caso possono specificare esplicitamente la sequenza dei digipeaters dai quali vogliono essere ripetute (anche questa circostanza non si verifica frequentemente) oppure, più spesso, richiedono semplicemente che il loro pacchetto venga ripetuto uno o più volte riferendosi ai digipeaters con il loro alias generico (digipeating generico).

Il digipeating generico è uno strumento molto efficace per diffondere i pacchetti APRS perché le stazioni che chiedono di essere ripetute non devono conoscere la struttura della rete (questo è particolarmente utile per le stazioni mobili) e nel caso di ripetizioni multiple i pacchetti APRS possono essere diffusi in tutte le direzioni (fenomeno dell'UI flooding).

Tradizionalmente i digipeaters della rete APRS erano divisi in due categorie: digipeaters con alias WIDE, ubicati in posizione geografica favorevole, con ampia copertura radio, e stazioni con alias RELAY, spesso gli stessi *client* della rete.

Il tradizionale percorso di trasmissione di "RELAY, WIDE" richiedeva l'aiuto delle vicine stazioni di casa cooperanti come primo passo nella rete APRS.

Normalmente, i digipeaters WIDE rispondevano anche all'alias "RELAY", quindi un digipeater WIDE poteva anche servire come prima ripetizione.

Se si desiderava essere ripetuti più volte, occorreva specificare un percorso del tipo "RELAY, WIDE,

WIDE". Le stazioni fisse che riuscivano a farsi ascoltare direttamente da digipeaters WIDE potevano specificare percorsi di tipo WIDE o WIDE, WIDE evitando di appoggiarsi a stazioni RELAY, con beneficio per il traffico locale.

Come nel packet radio convenzionale, ogni digipeater nella catena "cancellava" il segnale di chiamata a cui aveva risposto aggiungendo un asterisco al "nominativo".

Questo tipo di percorso funzionava con qualsiasi tipo di TNC utilizzato come digipeater, (non era necessario un firmware dedicato) ma aumentava la dimensione dei pacchetti e, dato che i TNC non erano in grado di riconoscere i pacchetti che avevano già ripetuto, causava inutili duplicazioni dei pacchetti se si effettuavano più di due ripetizioni WIDE.

Con la crescente popolarità dell' APRS, la congestione del canale aumentò notevolmente.

Per risolvere questi problemi dalla seconda metà degli anni 2000 (in Europa dal 2008) è stata introdotta una convenzione sul percorso completamente nuova. La convenzione di percorso "Nuovo paradigma" interrompe completamente l'uso di "RELAY" e "WIDE" e utilizza esclusivamente percorsi di tipo WIDEn-N, già previsti nelle specifiche originali del protocollo APRS. Inoltre, attualmente i digipeaters dispongono di firmware interni in grado di rilevare pacchetti duplicati ed evitare di ritrasmetterli – ma solo se il percorso è un percorso WIDEn-N – ed è possibile impostarli per ignorare (o troncature) percorsi troppo lunghi.

Ciò riduce notevolmente la congestione del canale causata da pacchetti duplicati e blocca il disturbo fuori area causato dall'abuso di eccessive ripetizioni.

Per garantire alle stazioni mobili l'appoggio di stazioni fisse in aree poco coperte, come accadeva con le stazioni RELAY, il nuovo paradigma ha previsto la possibilità di configurare stazioni domestiche in posizione favorevole come "fill-in digipeaters" abilitando il digipeating con alias "WIDE1-1".

Le stazioni mobili possono così utilizzare percorsi del tipo "WIDE1-1, WIDE2-1" appoggiandosi indifferentemente per il primo salto a digipeaters veri e propri oppure a "fill-in digipeaters".

I "fill-in digipeaters", tuttavia, devono essere attivati con cautela e solo se nella zona l'accesso ai digipeaters WIDE da parte delle stazioni mobili/portatili è difficoltoso: l'attivazione indiscriminata di queste stazioni ripetitrici causa infatti inutili duplicazioni dei pacchetti e conseguente riduzione della capacità del canale radio.

Infine, la diffusione di internet rende oggi possibile un'altra modalità di funzionamento della rete APRS particolarmente efficiente che impiega *gateways* tra rete radio e web (stazioni "IGATES"). Attualmente sono operative numerose stazioni IGATES di ascolto sul territorio che inoltrano i pacchetti ricevuti ad una rete di server su internet (APRS-IS). Collegandosi alla rete APRS-IS tramite software client o appositi siti web (ad esempio aprs.fi) è possibile visualizzare su mappe il traffico APRS proveniente da ogni parte del mondo.

Esistono anche stazioni IGATES che operano al contrario, riversando una parte delle informazioni dei server APRS-IS sul canale radio; il loro impiego tuttavia è scoraggiato perché la capacità del canale radio è limitata ed è facilmente saturabile dalla notevole quantità di informazioni – anche filtrata – proveniente da internet.

CAPITOLO 2 Accesso al canale condiviso

2.1 frames APRS e capacità del canale trasmissivo

La trasmissione dei dati APRS avviene su un unico canale radio della banda dei due metri con modulazione AFSK a 1200 bps, ottenuta iniettando nell'ingresso microfonico di un trasmettitore FM un segnale audio generato da un modem Bell202. Si tratta di una soluzione non ottimale sotto diversi punti di vista (bassa efficienza spettrale, bassa velocità di trasmissione, sensibilità ai disturbi), motivata dalla disponibilità a basso costo del modem Bell negli anni in cui fu introdotto lo standard (primi anni '80 del secolo scorso) e dalla possibilità dell'impiego per trasmissione dati di radio concepite per comunicazioni vocali.

Per stimare quanti frames è possibile trasmettere su un simile canale condiviso è necessario innanzitutto valutare la lunghezza media di un frame (pacchetto) APRS. Il protocollo APRS utilizza solo i frame di tipo UI (unnumbered information) del protocollo AX25 e divide il pacchetto UI in sette sezioni come descritto nella tabella seguente:

1	Flag	1 byte	01111110 (hex 7E), delimita l'inizio del pacchetto
2	Address	21 bytes	Sorgente (7bytes), destinazione (7bytes), digipeater (7bytes)
3	Control	1 byte	hex 03 (frame UI)
4	Protocol Identifier	1 byte	hex F0 (nessun protocollo di livello 3)
5	Information	128 bytes	La lunghezza del campo dipende dal tipo di informazione trasmessa, solitamente è pari a 80-90 bytes ma può arrivare fino a 209 bytes.
6	Frame Check Sequence	2 bytes	CRC, numero a 16 bit calcolato da sorgente e destinazione, usato per verificare l'integrità del pacchetto.
7	Flag	1 byte	01111110 (hex 7E), delimita la fine del pacchetto.

La lunghezza complessiva di un frame è mediamente pari a 155 bytes, ai quali vanno aggiunti 45 bytes di flags (hex 7E) trasmessi all'inizio per dare il tempo agli apparati di commutare in trasmissione, assumendo un ritardo in trasmissione (txdelay) di 0,3s alla velocità di 1200bps.

In totale la lunghezza di un pacchetto (frame) APRS è pari mediamente a 200 bytes; alla velocità di 1200 bps ogni frame richiede mediamente 1,33 secondi per essere trasmesso.

Nella tecnologia APRS la capacità del canale trasmissivo è riferita al "ciclo di rete", cioè all'intervallo di tempo minimo stabilito arbitrariamente nel quale tutte le stazioni trasmettono almeno una volta un pacchetto. Dato che L'APRS è - o dovrebbe essere - un sistema di comunicazioni in tempo reale, il ciclo di rete non dovrebbe durare troppo a lungo, per permettere in breve tempo di avere il quadro completo delle stazioni in campo. Numerosi documenti concordano su valori ragionevoli del ciclo di rete compresi tra 10 e 30 minuti, tipicamente 20 minuti.

In 20 minuti alla velocità di 1200bps (150 bytes/sec) è teoricamente possibile trasmettere fino a 900 frames della lunghezza complessiva di 200 bytes ciascuno, per complessivi 180000 bytes.

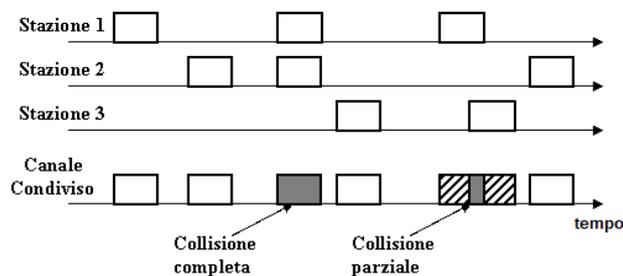
velocità di trasmissione		durata di un ciclo di rete	Lunghezza di un frame	Capacità complessiva di un ciclo di rete	
bps	B/s	min	B	B	frames
1200	150	20	200	180000	900

2.2 Prestazioni e limiti del protocollo ALOHA puro

Ogni volta che più terminali di una rete telematica devono accedere ad un mezzo trasmissivo condiviso, sia esso un cavo o un canale radio, è necessario stabilire delle regole di comunicazione per evitare che più terminali trasmettano dati contemporaneamente dando luogo a collisioni con perdita di informazioni; il metodo più semplice di accesso al canale condiviso è denominato “ALOHA”.

Il protocollo “ALOHA” è stato sviluppato nel 1970 dal prof. Norman Abramson dell’ Università delle Hawaii per collegare ad un server centrale tramite rete radio i computer delle diverse sedi dell’ Ateneo sparsi per le isole dell’ arcipelago. La versione originale del protocollo, denominata “ALOHA puro” prevede che non appena un terminale della rete ha un pacchetto da trasmettere lo invii senza preoccuparsi di verificare se il canale è libero. Si accettano le inevitabili collisioni prevedendo, eventualmente, una ritrasmissione dei pacchetti trasmessi non confermati dal ricevente.

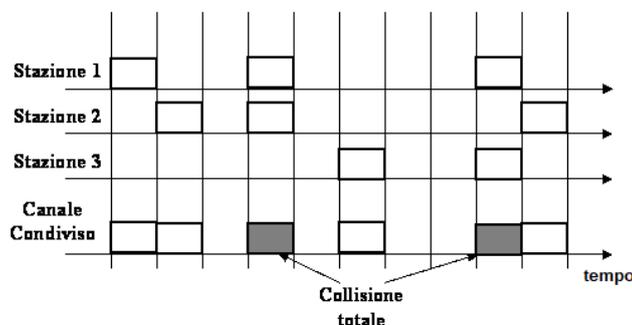
Ammettendo che i pacchetti abbiano tutti la stessa lunghezza, il periodo di vulnerabilità della comunicazione è pari al doppio della durata di un pacchetto perché è sufficiente una sovrapposizione parziale dei pacchetti (al limite di un solo bit) per perderne l’intero contenuto.



Collisione completa e parziale nel protocollo ALOHA puro

Una versione più evoluta del protocollo, denominata “slotted ALOHA”, prevede che la trasmissione avvenga a precisi intervalli temporali (“slot”) della durata di un pacchetto. Ogni stazione è vincolata a cominciare la propria trasmissione all’inizio di uno slot temporale.

In questo caso il periodo di vulnerabilità della comunicazione è pari alla durata di un singolo pacchetto perché i pacchetti si sovrappongono completamente oppure non avviene nessuna collisione.



Collisione nel protocollo slotted ALOHA

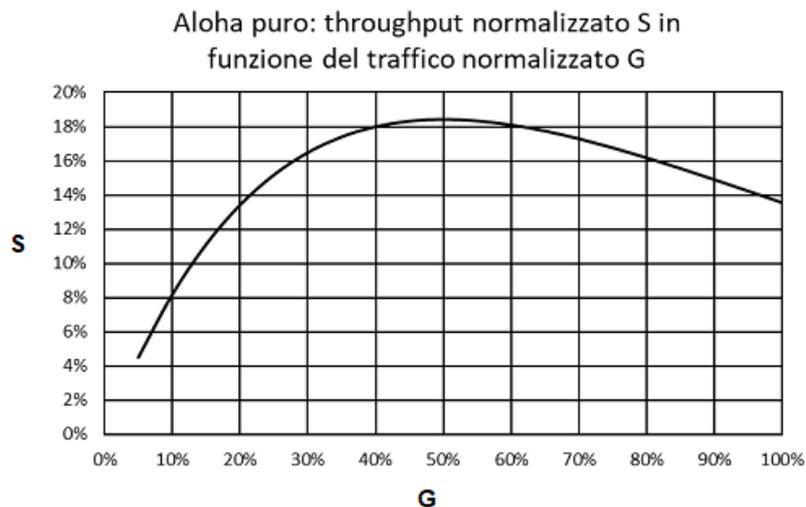
In questo modo si dimezza la probabilità di collisioni e si aumenta l’efficienza della comunicazione. La realizzazione di un accesso condiviso del tipo “slotted ALOHA” richiede però una sincronizzazione delle stazioni tra di loro, impossibile da realizzare con l’hardware disponibile per il packet radio amatoriale; per questo motivo nel seguito ci proponiamo di valutare come il protocollo ALOHA puro influenzi le prestazioni delle comunicazioni su un canale condiviso senza prendere in considerazione il protocollo slotted ALOHA.

Immaginiamo quindi di avere un canale di comunicazione condiviso nel quale numerose stazioni inviano pacchetti tutti della stessa lunghezza in modo casuale con lo stesso livello di segnale, senza preoccuparsi di ascoltare se il canale è libero (protocollo di accesso al mezzo condiviso ALOHA puro).

Indichiamo con G la frazione della capacità del canale impegnata dal traffico (traffico normalizzato) e con S la quantità di informazione trasmessa con successo riferita alla capacità complessiva del canale (throughput normalizzato).

Studi teorici dimostrano che, per un simile accesso al canale condiviso, il throughput normalizzato S dipende dal traffico normalizzato G secondo la relazione

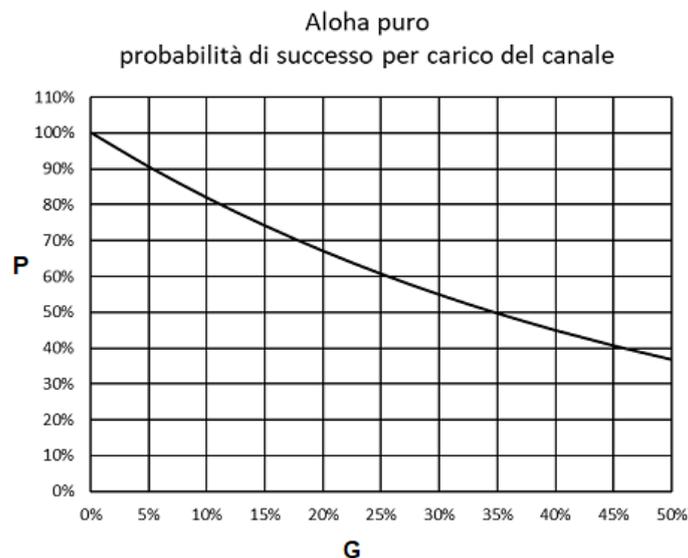
$$S = G e^{-2G}$$



Il throughput massimo è pari al 18,4% della capacità complessiva del canale in corrispondenza di un utilizzo del canale trasmissivo del 50% ($G=0,5$); in queste condizioni la percentuale massima di pacchetti ricevuti con successo è pari al 36,8% del traffico totale generato.

Se il traffico eccede il 50% della capacità complessiva del canale trasmissivo non solo il throughput diminuisce, ma la rete diventa instabile ed avviene il collasso delle comunicazioni.

Per aumentare la probabilità di trasmettere pacchetti con successo è necessario ridurre il carico del canale.



Nel contesto del packet radio la situazione che abbiamo descritto sopra si verifica quando un certo numero di terminali, che non si ascoltano tra di loro (e quindi il loro meccanismo di controllo delle collisioni è inefficace), trasmettono in modo casuale frames ad una stazione privilegiata di ascolto, che ascolta tutti i terminali. Tipicamente ciò si verificava per i satelliti per il packet radio convenzionale che ospitavano BBS (ad esempio pacsat-AO16). Questi satelliti avevano canali di uplink dedicati all'ascolto delle stazioni terrestri – che a causa della grande distanza reciproca non si ascoltavano tra di loro e non potevano operare nessun controllo sulle collisioni – e un canale di downlink di tipo broadcast.

Riferendosi alla capacità complessiva di un ciclo di rete APRS calcolata precedentemente (900 frames/ciclo) è possibile stimare il numero di frames ricevibili con successo dalla stazione privilegiata in funzione del carico del canale G in una situazione di questo tipo:

Traffico	Throughput	Collisioni	Inutilizzato	Probabilità di successo	Frames trasmessi	Frames ricevuti con successo
G	S	C=G-S	I=1-G	$P = S/G$	fr/ciclo	fr/ciclo
0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	0	0
5%	4,5%	0,5%	95,0%	90,5%	45	41
10%	8,2%	1,8%	90,0%	81,9%	90	74
15%	11,1%	3,9%	85,0%	74,1%	135	100
20%	13,4%	6,6%	80,0%	67,0%	180	121
25%	15,2%	9,8%	75,0%	60,7%	225	136
30%	16,5%	13,5%	70,0%	54,9%	270	148
35%	17,4%	17,6%	65,0%	49,7%	315	156
40%	18,0%	22,0%	60,0%	44,9%	360	162
45%	18,3%	26,7%	55,0%	40,7%	405	165
50%	18,4%	31,6%	50,0%	36,8%	450	166

Osserviamo che nella situazione di massimo carico possibile del canale (G=50%) potremo trasmettere ben 450 frames per ciclo di rete, dei quali tuttavia solo il 36,8% (166 frames) saranno correttamente ricevuti dalla stazione privilegiata e quasi 2/3 persi in collisioni, rendendo la comunicazione inaffidabile.

Riducendo il carico di rete al 15% della capacità del canale, corrispondente a 135 frames trasmessi per ciclo di rete, ben 100 frames saranno ricevuti con successo. La probabilità di successo della comunicazione verso la stazione privilegiata sarà ora pari all'74,1%.

Assumendo che le stazioni APRS mobili in rete siano circa la metà delle stazioni fisse, potranno trasmettere con buona probabilità di successo verso la stazione privilegiata di ascolto 57 stazioni, 19 mobili che trasmettono un frame ogni 5 minuti e 40 fisse che trasmettono un frame ogni 20 minuti.

La situazione descritta, che non si verifica attualmente nella rete APRS, è un utile punto di partenza per la valutazione delle prestazioni di situazioni più complesse che tratteremo successivamente.

2.3 CSMA: ascolta prima di trasmettere

CSMA (Carrier Sense Multiple Access) è un metodo di controllo di accesso al canale condiviso di tipo distribuito nel quale il traffico del canale trasporta l'informazione sul controllo del proprio flusso. E' nato nel 1971 per l'uso nei canali packet radio e successivamente è stato impiegato anche in reti cablate, in particolare nelle reti ethernet nella versione CSMA/CD.

Si ascolta il canale prima di trasmettere; se il canale è libero si esegue un algoritmo che decide quando effettuare la trasmissione.

Esistono tre versioni del protocollo che si distinguono per l'algoritmo di decisione:

- CSMA non-persistente: ascolta il canale prima di trasmettere; se è libero trasmetti, se è occupato attendi un intervallo di tempo casuale e riprova.
- CSMA p-persistente: ascolta il canale prima di trasmettere; se è occupato aspetta, se è libero trasmetti con probabilità "p".
- CSMA 1-persistente: ascolta il canale prima di trasmettere; se è libero trasmetti, se è occupato aspetta che si liberi e trasmetti.

Nei TNC impiegati per il packet radio sono comuni la versione 1-persistente, utilizzata in particolare per il digipeating, e la più elaborata versione p-persistente che, sebbene più efficiente, viene impiegata raramente perché per poter funzionare correttamente richiede che tutte le stazioni impostino gli stessi parametri che definiscono la probabilità di trasmissione.

Un parametro importante che influenza le prestazioni di tutte le versioni del protocollo CSMA è la finestra di collisione "a", causata dal ritardo di propagazione dell'informazione, definita dalla relazione:

$$a = t_p / t_f$$

nella quale "t_p" è il tempo di propagazione dell'informazione e "t_f" è la durata di un pacchetto.

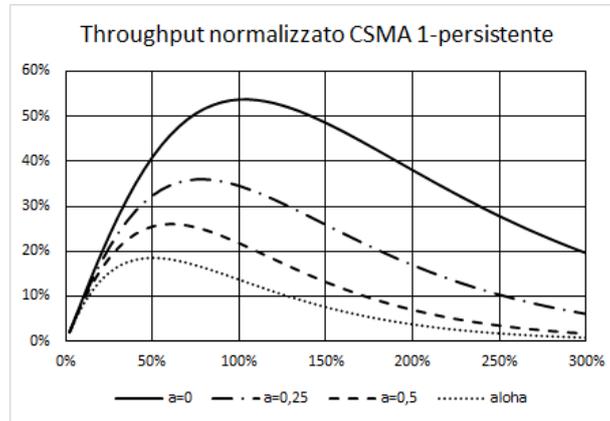
Riferendosi alla versione 1-persistente, in letteratura si trova che il throughput S dipende solamente dal traffico normalizzato G e dall'ampiezza della finestra di collisione, ed è dato da:

$$S = \frac{G e^{-G(1+2a)} [1 + G + aG (1 + G + \frac{aG}{2})]}{G(1+2a) - (1 - e^{-aG}) + (1 + aG) e^{-G(1+a)}}$$

Se la finestra "a" è sufficientemente piccola (tempo di propagazione molto inferiore alla durata del pacchetto, a = 0) la relazione precedente si semplifica in:

$$S = \frac{G + G^2}{1 + G e^G}$$

Al crescere dell'ampiezza della finestra di collisione "a" le prestazioni diminuiscono fino a diventare confrontabili con le prestazioni del protocollo ALOHA puro per $a > 0,5$



G	a=0	a=0,25	a=0,5	a=0,75	Aloha puro
2%	2,0%	2,0%	2,0%	1,9%	1,9%
10%	9,9%	9,4%	9,0%	8,5%	8,2%
20%	19,3%	17,5%	15,9%	14,4%	13,4%
30%	27,8%	24,0%	20,8%	18,0%	16,5%
40%	35,1%	28,9%	23,9%	19,8%	18,0%
50%	41,1%	32,4%	25,6%	20,2%	18,4%
60%	45,9%	34,6%	26,1%	19,7%	18,1%
70%	49,4%	35,7%	25,8%	18,6%	17,3%
80%	51,8%	36,0%	24,8%	17,0%	16,2%
90%	53,2%	35,5%	23,4%	15,4%	14,9%
100%	53,8%	34,5%	21,8%	13,6%	13,5%

Tabella: throughput S in funzione del traffico G per diversi valori di "a" e confronto con ALOHA

Nel caso delle comunicazioni packet radio amatoriali a 1200 bps che usano apparati per comunicazioni vocali FM, la durata media della trasmissione di un pacchetto stimata precedentemente è pari a 1,33s, mentre il tempo di propagazione dell'informazione è dominato dal tempo di commutazione degli apparati e si può stimare in 0,3s; la finestra di collisione sarà quindi

$$a = 0,3 / 1,33 = 0,23$$

che comporta un throughput massimo pari al 36% per un traffico complessivo offerto $G=80\%$. La probabilità di successo della trasmissione non è molto elevata ($P = 36/80 = 45\%$); per aumentare l'affidabilità delle comunicazioni al 72% è necessario dimezzare il traffico offerto ($G=40\%$) con una consistente riduzione del throughput ($S=28,9\%$).

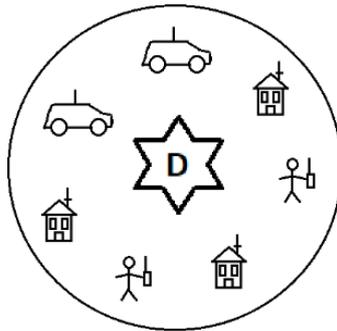
Nonostante ciò in un ciclo di rete di 20 minuti si possono trasmettere con buona probabilità di successo ben 360 frames, pari a 144 stazioni, 72 mobili che trasmettono un frame ogni 5 minuti e 72 fisse che trasmettono un frame ogni 20 minuti.

Le stazioni però si dovrebbero tutte ascoltare tra loro, il che è altamente improbabile data l'ampiezza del loro orizzonte radio (in pianura mediamente 5 km per una stazione mobile, 10 km per una stazione fissa).

CAPITOLO 3 Reti APRS con un solo digipeater

3.1 Rete con un solo digipeater isofrequenza

Immaginiamo ora che in rete sia presente un solo digipeater che ascolta tutte le stazioni con lo stesso livello di segnale (terminale esposto) e che ripete i pacchetti correttamente ricevuti. Le stazioni in rete non si ascoltano tra di loro (terminali nascosti) ma ascoltano tutte il digipeater, e trasmettono i loro pacchetti in modo casuale quando avvertono il canale libero, cioè quando il digipeater non trasmette. Al contrario, quando il digipeater è in trasmissione, nessun pacchetto viene emesso dalle stazioni terminali.



Il ciclo di rete risulta suddiviso dal punto di vista logico in due slot temporali, uno impiegato per la generazione del traffico da parte dei terminali della rete con protocollo ALOHA puro, che chiameremo “slot di uplink”, e uno impiegato per la ripetizione dei pacchetti validi ricevuti da parte del digipeater con protocollo CSMA 1-persistente, che chiameremo “slot di downlink”.

Supponiamo per semplicità che la finestra di collisione del protocollo CSMA 1-persistente sia molto piccola, così che ai bassi carichi di rete tutto il traffico offerto (throughput dello slot di uplink) sia ripetuto senza collisioni.

Riferendosi allo slot di uplink e indicando con G il traffico normalizzato, avremo che throughput “ S ”, collisioni “ C ”, fattore di inutilizzo “ I ” e probabilità di successo “ P ” delle trasmissioni si possono calcolare con le espressioni precedenti riferite ad un canale ALOHA puro.

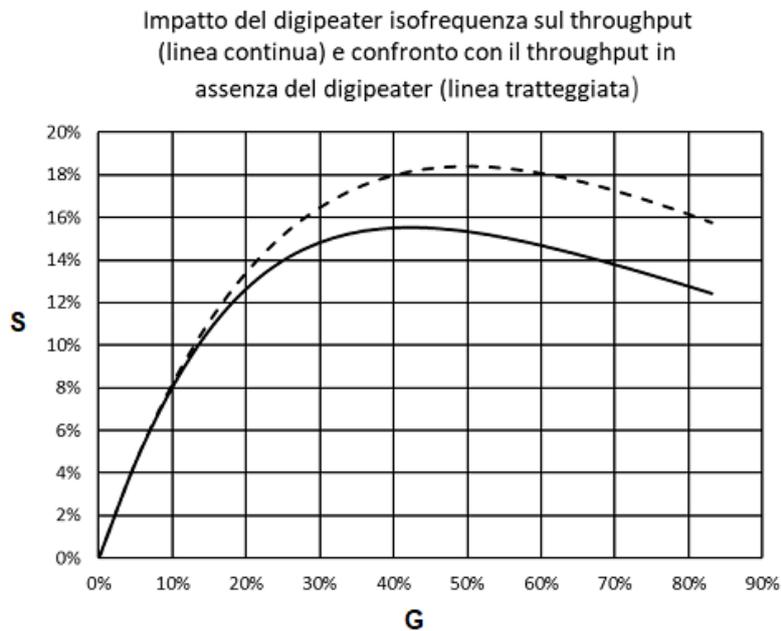
Ma dato che tutto il throughput dello slot di uplink viene ripetuto dal digipeater la capacità complessiva “ K ” del canale riferita allo slot di uplink è

$$K = 1 + S = 1 + G e^{-2G}$$

Per calcolare le espressioni del traffico dello slot di uplink G_k , del throughput S_k , delle collisioni C_k e della frazione di canale libero I_k rispetto al traffico nello slot di uplink G normalizzati rispetto alla capacità complessiva del canale è sufficiente rinormalizzare G , S , C e I rispetto a K

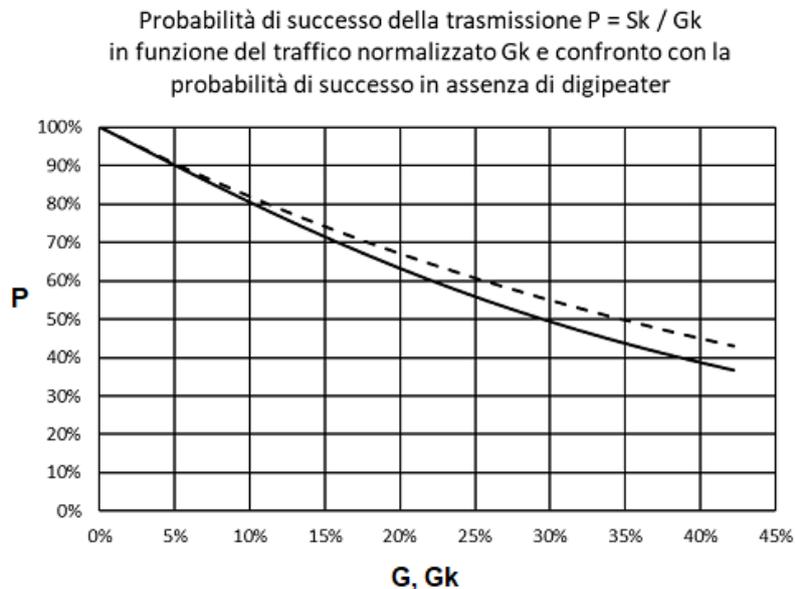
$$\begin{aligned} G_k &= G / K = G / (1 + G e^{-2G}) \\ S_k &= S / K = G e^{-2G} / (1 + G e^{-2G}) \\ C_k &= G (1 - e^{-2G}) / (1 + G e^{-2G}) \\ I_k &= (1 - G) / (1 + G e^{-2G}) \end{aligned}$$

Rappresentiamo anche in questo caso il throughput normalizzato S_k rispetto al traffico normalizzato G_k e confrontiamolo con il grafico del throughput del caso precedente (canale condiviso con protocollo ALOHA puro senza digipeater):



Osserviamo che, come ci aspettavamo, il throughput è sempre inferiore al caso ALOHA puro in assenza di digipeater, e il massimo throughput $S_{k,max} = 15,5\%$ si ha in corrispondenza di un carico del canale inferiore ($G_k = 42,2\%$), essendo una parte della capacità del canale impegnata per il digipeating.

A parità di traffico normalizzato diminuisce anche la probabilità di successo della trasmissione, soprattutto quando il traffico nel canale è elevato.

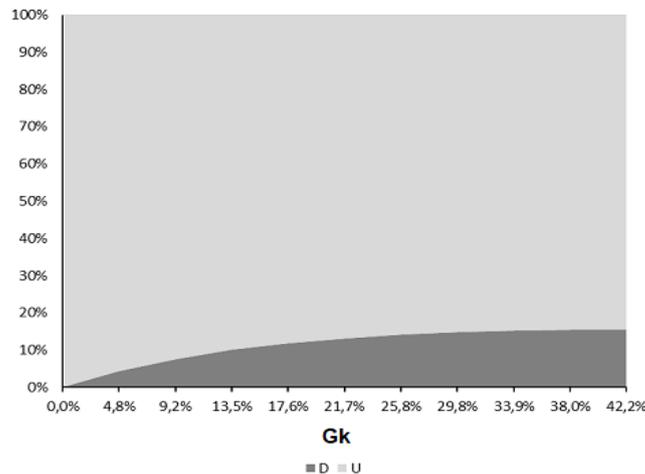


APRS - Prestazioni e limiti

Traf- fico slot uplink	Traf- fico nor- maliz- zato	Throu- ghput nor- maliz- zato	Colli- sioni nor- maliz- zate	Frazione del ca- nale im- piegata per il di- gipea- ting	Fra- zione del ca- nale non utiliz- zata	Proba- bilità di suc- cesso
G	Gk	Sk	Ck	Rk	Ik	P = Sk/Gk
0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
5%	4,8%	4,3%	0,5%	4,3%	90,9%	90,5%
10%	9,2%	7,6%	1,7%	7,6%	83,2%	81,9%
15%	13,5%	10,0%	3,5%	10,0%	76,5%	74,1%
20%	17,6%	11,8%	5,8%	11,8%	70,5%	67,0%
25%	21,7%	13,2%	8,5%	13,2%	65,1%	60,7%
30%	25,8%	14,1%	11,6%	14,1%	60,1%	54,9%
35%	29,8%	14,8%	15,0%	14,8%	55,4%	49,7%
40%	33,9%	15,2%	18,7%	15,2%	50,9%	44,9%
45%	38,0%	15,5%	22,6%	15,5%	46,5%	40,7%
50%	42,2%	15,5%	26,7%	15,5%	42,2%	36,8%

Tabella: Ripartizione dell'utilizzo del canale in funzione del traffico offerto e probabilità di successo della trasmissione – rete con un solo digipeater isofrequenza

Ripartizione dell'ampiezza dei due slot (uplink e downlink)
in funzione del traffico aloha Gk



Traffico normaliz- zato	Ampiezza dello slot di downlink	Ampiezza dello slot di uplink
Gk	D	U
0,0%	0,0%	100,0%
4,8%	4,3%	95,7%
9,2%	7,6%	92,4%
13,5%	10,0%	90,0%
17,6%	11,8%	88,2%
21,7%	13,2%	86,8%
25,8%	14,1%	85,9%
29,8%	14,8%	85,2%
33,9%	15,2%	84,8%
38,0%	15,5%	84,5%
42,2%	15,5%	84,5%

Quando il carico della rete è ridotto, tuttavia, l'introduzione del digipeater sul canale penalizza poco throughput e probabilità di successo della trasmissione rispetto alla situazione senza digipeater, perché quando il carico si riduce diminuisce anche l'impiego del canale per il digipeating e di conseguenza aumenta l'ampiezza dello slot di uplink.

Riferendosi alla capacità complessiva del ciclo di rete calcolata precedentemente (900 frames/ciclo) è possibile stimare anche in questo caso il numero di frames ricevuti con successo in funzione del carico di rete.

Traffico normalizzato	Probabilità di successo	Frames trasmessi per ciclo di rete	Frames ricevuti per ciclo di rete
Gk	P = Sk/Gk	fr/ciclo	fr/ciclo
0,0%	100,0%	0	0
4,8%	90,5%	43	39
9,2%	81,9%	83	68
13,5%	74,1%	121	90
17,6%	67,0%	159	106
21,7%	60,7%	195	119
25,8%	54,9%	232	127
29,8%	49,7%	268	133
33,9%	44,9%	305	137
38,0%	40,7%	342	139
42,2%	36,8%	380	140

Tabella: Frames APRS ricevuti con successo in funzione del traffico offerto – rete con un solo digipeater isofrequenza

Nella situazione di massimo carico possibile del canale (Gk=42,2%) potremo trasmettere ben 380 frames per ciclo di rete, dei quali tuttavia solo il 36,8% (140 frames) saranno correttamente ricevuti e ripetuti dal digipeater e quasi 2/3 persi in collisioni, rendendo la comunicazione inaffidabile.

Riducendo il carico della rete al 13,5%, corrispondente a 121 frames trasmessi dai terminali in campo per ciclo di rete, ben 90 frames saranno ricevuti e ripetuti con successo elevando l'affidabilità della comunicazione al 74,1% (solamente 1/4 dei pacchetti trasmessi sarà perso in collisioni).

Assumendo anche in questo caso che le stazioni mobili in rete siano circa la metà delle stazioni fisse potremo servire con elevata probabilità di successo 53 stazioni, 17 stazioni mobili che trasmettono un frame ogni 5 minuti e 36 stazioni fisse che trasmettono un frame ogni 20 minuti, prestazioni che non si discostano molto da quelle di un canale ALOHA senza digipeater.

Nel caso di una rete con un solo digipeater non appare quindi giustificato impiegare frequenze separate per l'uplink e il downlink, perché i miglioramenti del throughput sarebbero modesti a spese di un aumento di complessità delle stazioni terminali e del digipeater, che dovrebbero poter operare contemporaneamente su due frequenze diverse ed essere dotati di due TNC.

3.2 Maggiore efficienza: un solo digipeater, più canali di uplink

Una soluzione classica per aumentare il throughput è quella di impiegare più canali di uplink – ad esempio in UHF –, ai quali i terminali in campo accedono con protocollo ALOHA, e un canale di downlink – ad esempio in VHF – ricevuto da tutte le stazioni, nel quale il digipeater ripete il throughput complessivo dei canali di uplink, eventualmente in modo ridondante e/o integrato da altre informazioni sullo stato della rete.

Dato che il throughput massimo per ogni canale di uplink è il 18,4% della rispettiva capacità complessiva, un singolo canale di downlink potrebbe servire in teoria fino a 5 canali di uplink alla stessa velocità, ($100/18,4=5,43$) e il throughput massimo sul canale di downlink potrebbe arrivare al 92% ($18,4\% * 5 = 92\%$).

Per poter trasmettere informazioni in modo ridondante, tuttavia, sembra opportuno ridurre il numero massimo di canali di uplink a 4, con un throughput massimo complessivo corrispondente pari al 73,6% ($18,4\% * 4 = 73,6\%$).

Anche in questo caso per assicurare un'elevata probabilità di successo della comunicazione è necessario ridurre sensibilmente il carico per ogni canale di uplink:

Traffico su 1 canale di uplink	Throughput per 1 canale di uplink	Throughput tot (4 canali)	Probabilità di successo	Frames trasmessi	Frames ricevuti
G	S	4 S	P	fr/ciclo	fr/ciclo
5,0%	4,5%	18,1%	90,5%	180	163
10,0%	8,2%	32,7%	81,9%	360	295
15,0%	11,1%	44,4%	74,1%	540	400
20,0%	13,4%	53,6%	67,0%	720	483
25,0%	15,2%	60,7%	60,7%	900	546
30,0%	16,5%	65,9%	54,9%	1080	593
35,0%	17,4%	69,5%	49,7%	1260	626
40,0%	18,0%	71,9%	44,9%	1440	647
45,0%	18,3%	73,2%	40,7%	1620	659
50,0%	18,4%	73,6%	36,8%	1800	662

Tabella: Frames APRS ricevuti con successo in funzione del traffico offerto e probabilità di successo della trasmissione – rete con un solo digipeater, più canali di uplink e downlink separato

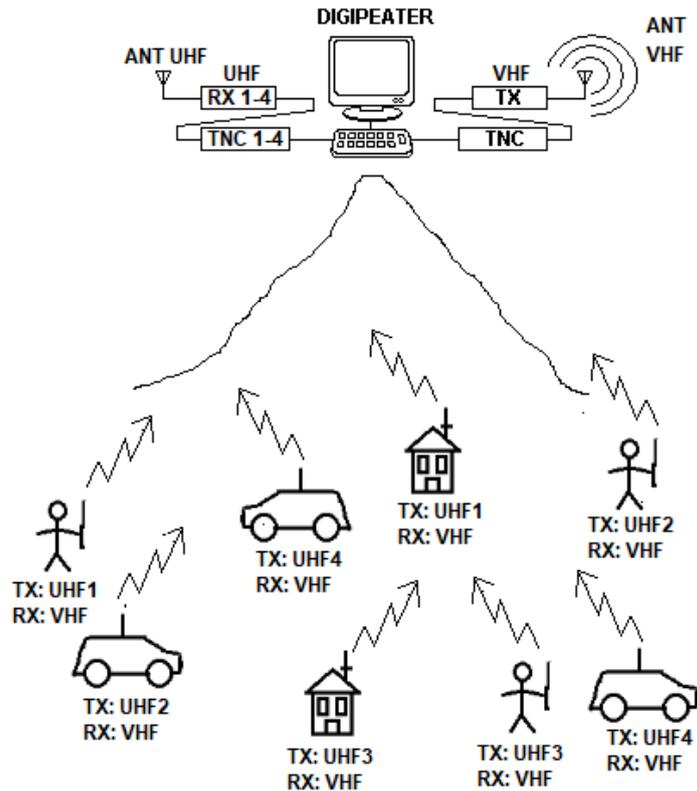
Per un carico del singolo canale di uplink del 15%, corrispondente a 135 frames trasmessi per ciclo di rete su ogni canale di uplink (540 frames complessivi), 400 frames saranno ricevuti con elevata probabilità di successo (74,1%).

Assumendo anche in questo caso che le stazioni mobili in rete siano circa la metà delle stazioni fisse, potranno trasmettere con elevata probabilità di successo 228 stazioni, 78 mobili che trasmettono un frame ogni 5 minuti e 150 fisse che trasmettono un frame ogni 20 minuti, a patto che il traffico sia distribuito equamente sui quattro canali di uplink.

Per distribuire uniformemente le stazioni tra i quattro canali si potrebbero stabilire regole basate, ad esempio, sulle lettere del nominativo, sulla natura delle stazioni (distinguendo tra stazioni fisse e mobili) oppure potrebbe essere lo stesso digipeater in base alle condizioni di traffico a suggerire ad alcune stazioni di passare ad un altro canale meno trafficato.

Una simile configurazione potrebbe servire con successo un'area geografica molto ampia o molto congestionata impiegando un solo digipeater, al prezzo di un aumento di complessità e di costo delle stazioni terminali, che dovrebbero essere dotate di due apparati, uno per la trasmissione in UHF e uno per la ricezione in VHF (oppure un apparato bibanda), e di due TNC.

Il digipeater dovrebbe essere molto più complesso, dotato di: quattro ricevitori VHF sintonizzati sui quattro canali di uplink, quattro TNC per la ricezione, un trasmettitore VHF, un TNC per la ritrasmissione dei pacchetti, ricevuti e software dedicato.



Per ridurre la complessità delle stazioni terminali è possibile pensare a soluzioni di compromesso che, a fronte di prestazioni inferiori, permettano l'uso di apparati monobanda e/o di un solo TNC per i terminali della rete.

Riferendosi alla configurazione appena descritta non è infatti strettamente necessario che le stazioni terminali utilizzino due TNC separati, uno per la trasmissione e uno per la ricezione: sfruttando il fatto che la trasmissione delle stazioni terminali ha carattere impulsivo (è sporadica e di breve durata) si potrebbe impiegare un solo TNC disabilitando il controllo CSMA e accettando di non ascoltare nel breve intervallo di tempo in cui si effettua la trasmissione del pacchetto APRS (1,33 secondi).

La ricezione delle informazioni potrebbe essere comunque garantita dalla ridondanza della trasmissione del digipeater.

Si potrebbero poi allocare i canali di uplink e il canale di downlink sulla stessa banda, ad esempio in VHF, così che le stazioni terminali potrebbero utilizzare apparati monobanda.

In particolare utilizzando solamente due canali di uplink spostati di +600kHz e -600kHz rispetto alla frequenza del canale di downlink si potrebbe sfruttare l'offset standard dei ponti radio analogici di cui sono dotati gli apparati amatoriali.

In questo modo le prestazioni sarebbero circa la metà di quelle precedentemente calcolate ma non sarebbe richiesta nessuna modifica delle stazioni terminali, solamente l'attivazione dell'offset per l'accesso ai ponti ripetitori. Anche in questo caso si potrebbero stabilire regole per distribuire le stazioni sui due canali di uplink: appare interessante la possibilità di avere una frequenza per le stazioni fisse e una per le stazioni mobili.

Questa soluzione obbligherebbe però ad installare cavità risonanti sul digipeater per ottenere la selettività necessaria, aumentandone ulteriormente la complessità, il costo e l'ingombro.

3.3 Rete APRS con ripetitore analogico?

La modulazione AFSK, particolarmente inefficiente e impiegata nelle comunicazioni packet radio a bassa velocità (1200 bps) per consentire il riutilizzo dei normali apparati radio FM analogici per comunicazioni vocali, consente almeno in teoria l'utilizzo di un ripetitore analogico convenzionale per la ripetizione dei pacchetti.

Il vantaggio principale di questa soluzione è che, in una simile configurazione, non esiste più il problema del terminale nascosto: dato che tutte le stazioni si ascoltano mutuamente in tempo reale tramite il ripetitore analogico, il meccanismo di accesso condiviso al canale CSMA (rilevazione della portante) installato presso i TNC dei terminali è efficace.

Un altro vantaggio di questo schema è l'assenza di ritardo nella propagazione dell'informazione: i terminali della rete ascoltano immediatamente il pacchetto in transito sul ponte nel momento stesso in cui viene generato, avendo la sensazione di essere connessi ad una rete che, nonostante la bassa velocità di trasmissione, risponde prontamente, rendendo possibile uno scambio di messaggi e bollettini in tempo reale.

L'idea è vecchia quasi quanto il packet radio: un vecchio documento di D. Engle, KE6ZE, dal titolo "Packet radio timing considerations" esaminava le prestazioni di tre diverse modalità di connessione, diretta, attraverso un ripetitore analogico e tramite un digipeater convenzionale, arrivando a concludere che l'impiego di un ripetitore analogico è più efficiente del digipeating convenzionale. L'autore aveva condotto esperimenti su un ripetitore standard per voce con un ritardo in trasmissione di 500ms. Qualche anno più tardi (1987) R. Finch e S.Avent, in un altro documento "A duplex packet radio repeater approach to layer one efficiency", riprendevano e perfezionavano l'idea, evidenziando come un "turn-around" sufficientemente veloce fosse la chiave per un'operazione essenzialmente trasparente, così come una catena audio la più pulita possibile per ridurre il numero di errori, proponendo l'impiego di appositi ripetitori invece del riuso dei ripetitori FM in fonia, a loro dire – e non a torto – inadeguati.

Immaginando infatti di utilizzare ripetitori FM convenzionali, i tempi di commutazione/attivazione dei trasmettitori sono almeno doppi rispetto alla comunicazione diretta e l'ampiezza della finestra di collisione del protocollo CSMA è almeno doppia rispetto a quella calcolata nel capitolo precedente ($a=0,46$ invece di $a=0,23$).

Per una simile ampiezza della finestra di collisione i calcoli teorici indicano un throughput massimo $S=26\%$ per un traffico normalizzato $G=60\%$ (affidabilità 43,3%), prestazioni non molto superiori a quelli di un canale ALOHA; se aggiungiamo poi che il segnale AFSK si degrada passando nel ripetitore – e quindi aumenta la probabilità di errori – il divario tra le due soluzioni si riduce ulteriormente.

Ai bassi carichi, necessari per avere comunicazioni più affidabili, il divario tra le soluzioni diventa trascurabile:

1.	Traffico offerto G	Throughput S	Probabilità di successo P
CSMA – 1 persistente ($a=0,5$) (ripetitore analogico) (*)	20%	15,9%	79%
ALOHA (uplink e downlink su due canali diversi)	20%	13,4%	67%
ALOHA + digipeating isofrequenza	20%	12,5%	64%

(*) si trascura il degrado del segnale introdotto dal ripetitore analogico

In conclusione l'impiego di un ripetitore analogico può essere una soluzione valida per la realizzazione di una rete APRS, a patto che i tempi di commutazione del ripetitore siano molto brevi e che il ripetitore distorca il segnale il meno possibile.

I vantaggi maggiori si hanno per alti valori del traffico offerto; quando la rete è poco caricata le prestazioni non sono molto superiori alle soluzioni convenzionali.

CAPITOLO 4 Prestazioni e limiti della rete APRS attuale

4.1 Impatto di più digipeaters in una rete isofrequenza

I risultati a cui siamo giunti nel capitolo precedente si riferiscono ad una rete nella quale i terminali in campo non si ascoltano tra di loro ed accedono al canale radio condiviso in modo casuale e in cui opera un solo digipeater che ascolta tutte le stazioni.

Cerchiamo ora di valutare l'impatto sul throughput locale della presenza di digipeaters adiacenti operanti sulla stessa frequenza che si ascoltano mutuamente, rendendo possibile il digipeating multiplo (che tuttavia è una pratica scoraggiata).

Per semplicità consideriamo il caso in cui ciascun digipeater ascolti e serva esclusivamente i terminali della sua area, che non avvenga il digipeating multiplo e che l'impiego di banda per la ripetizione dei pacchetti da parte dei digipeaters sia trascurabile rispetto alla capacità complessiva del canale, confondendo per ogni digipeater lo slot di uplink con l'intero canale.

Indicando con G il traffico complessivo nello slot di uplink di ciascun digipeater, il throughput complessivo S nello slot di uplink di ciascun digipeater sarà pari a

$$S = G e^{-2G}$$

Ma di tutto il throughput dello slot di uplink interessa solo la frazione utile prodotta dal traffico locale; immaginando che la proporzione tra frazione utile del throughput " S_L " e throughput complessivo " S " sia la stessa che intercorre tra traffico utile locale " G_L " e traffico complessivo " G " avremo che:

$$S_L = S (G_L / G)$$

Indicando con N il numero di digipeater adiacenti interferenti, con " S_L " il traffico da essi ripetuto – che, non avvenendo il digipeating multiplo si configura come un disturbo ALOHA nello slot di uplink locale – e con G_L il traffico normalizzato nello slot di uplink prodotto dalle sole stazioni locali, avremo che il traffico complessivo " G " nello slot di uplink sarà

$$G = G_L + N S_L$$

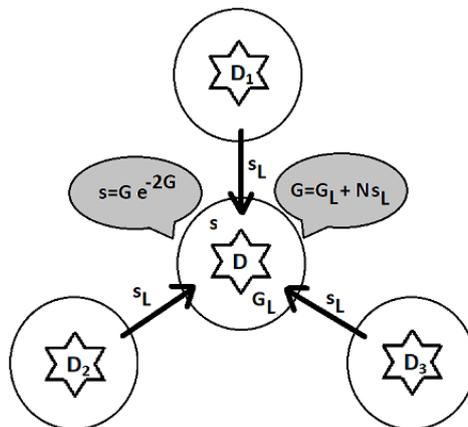


Figura: impatto dei digipeaters adiacenti sullo slot di uplink del digipeater centrale: solo la frazione G_L del traffico dello slot di upload è generato dai terminali locali, il resto è disturbo (Ns_L); il throughput dipende dal traffico complessivo G (traffico locale + disturbo).

Combinando le due relazioni precedenti avremo:

$$S_L = (G_L / G) G e^{-2G}$$

Semplificando per G ed esprimendo G_L in funzione di G:

$$S_L = (G - N S_L) e^{-2G}$$

e sviluppando i calcoli otterremo

$$S_L / (G - N S_L) = e^{-2G}$$

$$(G - N S_L) / S_L = e^{2G}$$

$$(G / S_L) - N = e^{2G}$$

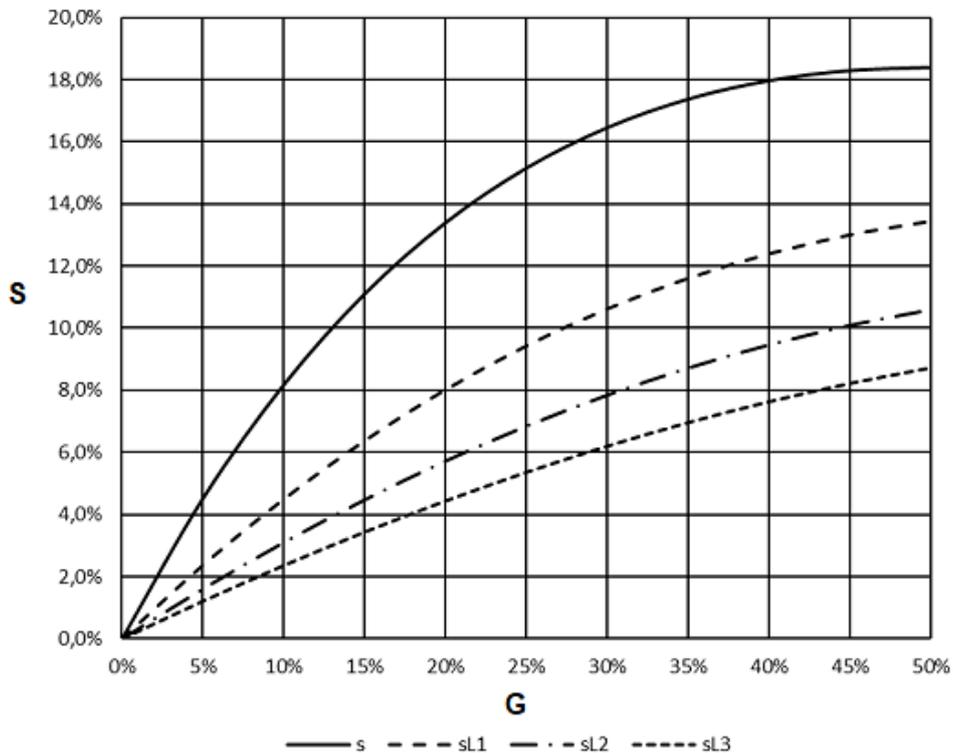
$$G / S_L = e^{2G} + N$$

$$S_L / G = 1 / (e^{2G} + N)$$

$$S_L = G / (e^{2G} + N)$$

La relazione ottenuta permette di calcolare la frazione di throughput utile S_L in funzione del traffico G ed ha significato per valori di $G < 0,5$.

Throughput locale s_L in funzione del traffico totale G
per $N=1,2,3$ digipeaters adiacenti interferenti



Traf- fico tot slot uplink	Throu- ghput tot	Throughput locale (utile)			Proba- bilità di suc- cesso
		1 digi in- terfe- rente	2 digi in- terfe- renti	3 digi in- terfe- renti	
G	S	SL1	SL2	SL3	P
0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
5%	4,5%	2,4%	1,6%	1,2%	90,5%
10%	8,2%	4,5%	3,1%	2,4%	81,9%
15%	11,1%	6,4%	4,5%	3,4%	74,1%
20%	13,4%	8,0%	5,7%	4,5%	67,0%
25%	15,2%	9,4%	6,9%	5,4%	60,7%
30%	16,5%	10,6%	7,8%	6,2%	54,9%
35%	17,4%	11,6%	8,7%	7,0%	49,7%
40%	18,0%	12,4%	9,5%	7,7%	44,9%
45%	18,3%	13,0%	10,1%	8,2%	40,7%
50%	18,4%	13,4%	10,6%	8,7%	36,8%

Tabella: Throughput locale in funzione del traffico totale offerto con 1,2,3 digipeaters interferenti

Ricordando poi che $S_L = S (G_L / G)$, possiamo ricavare il traffico locale corrispondente $G_L = (S_L / S) G$, che ci permette di stimare il numero massimo di frames utili trasmissibili nello slot di uplink locale per ciclo di rete, e quindi il numero massimo di stazioni che ciascun digipeater può servire.

Traf- fico tot slot up- link	Traffico locale (utile)			Frames locali trasmessi per ciclo di rete		
	1 digi inter- fente	2 digi inter- ferenti	3 digi inter- ferenti	1 digi inter- fente	2 digi- inter- ferenti	3 digi inter- ferenti
G	GL1	GL2	GL3	fr/ ciclo	fr/ ciclo	fr/ ciclo
0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0
5%	2,6%	1,8%	1,3%	24	16	12
10%	5,5%	3,8%	2,9%	49	34	26
15%	8,6%	6,0%	4,7%	78	54	42
20%	12,0%	8,5%	6,6%	108	77	60
25%	15,6%	11,3%	8,9%	140	102	80
30%	19,4%	14,3%	11,3%	174	129	102
35%	23,4%	17,6%	14,1%	210	158	127
40%	27,6%	21,1%	17,0%	248	190	153
45%	32,0%	24,8%	20,3%	288	223	182
50%	36,6%	28,8%	23,8%	329	259	214

Tabella: frames trasmissibili localmente con 1,2,3 digipeaters interferenti

Riferendosi al caso di tre digipeaters adiacenti interferenti, nella situazione di massimo carico possibile dello slot di uplink ($G=50\%$) potremo trasmettere 214 frames per ciclo di rete, dei quali tuttavia solo il 36,8% (79 frames) saranno correttamente ricevuti e ripetuti dal digipeater locale e quasi 2/3 persi in collisioni, rendendo la comunicazione inaffidabile.

Riducendo il carico della rete nello slot di uplink al 15%, corrispondente a 42 frames per ciclo di rete trasmessi dalle stazioni terminali, l'affidabilità della comunicazione aumenterà al 74,1% e sarà possibile ricevere con successo e ripetere 31 frames per ciclo di rete di 20 minuti, cioè 1 frame ogni 39 secondi.

Assumendo anche in questo caso che le stazioni mobili in rete siano circa la metà delle stazioni fisse ciascun digipeater in un ciclo di rete di 20 minuti potrà servire con elevata probabilità di successo solamente 21 stazioni, 7 stazioni mobili che trasmettono un frame ogni 5 minuti e 14 stazioni fisse che trasmettono un frame ogni 20 minuti.

Osserviamo come la presenza di digipeaters adiacenti sullo stesso canale penalizzi pesantemente il throughput locale.

4.2 Digipeating multiplo

Supponiamo ora che, nello scenario delineato, una stazione – che costituisce un'eccezione – invii un frame richiedendo che venga ripetuto da più digipeaters. Ci chiediamo: quale probabilità ha il pacchetto di arrivare a destinazione propagandosi con successo nella rete?

Consideriamo inizialmente il caso della propagazione del pacchetto in una catena di digipeaters adiacenti, ciascuno dei quali serve la sua "cella".

Un pacchetto che si propaga in una catena di N celle adiacenti sarà soggetto alle statistiche ALOHA N volte; in particolare la probabilità che sia correttamente ripetuto attraverso la catena sarà il prodotto delle probabilità che ha di attraversare con successo ogni singola cella.

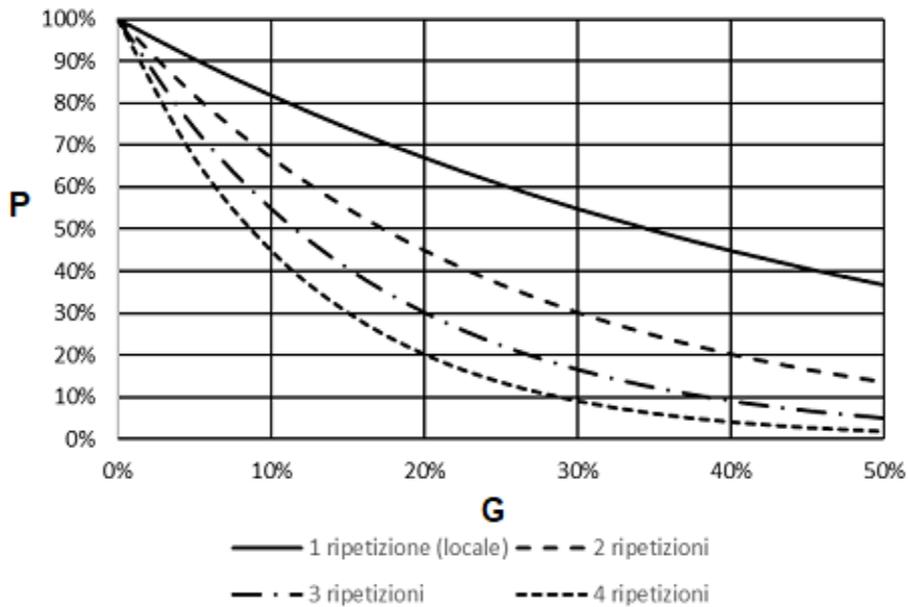
Supponendo che tutte le celle siano identiche e si trovino nelle stesse condizioni di carico G e indicando con P la probabilità che un pacchetto sia correttamente ripetuto in una cella, - che dipende dal carico G della cella stessa - avremo che la probabilità P_N che il pacchetto ha di attraversare con successo tutta la catena di digipeaters (incluso l'ultimo, perché gli utenti dell'ultima della cella ascoltano solo il proprio digipeater locale) sarà

$$P_N(G) = [P(G)]^N$$

Traf- fico com- ples- sivo G	Probabilità di successo della trasmissione			
	1 ripeti- zione (locale)	2 ripeti- zioni	3 ripeti- zioni	4 ripeti- zioni
0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
5%	90,5%	81,9%	74,1%	67,0%
10%	81,9%	67,0%	54,9%	44,9%
15%	74,1%	54,9%	40,7%	30,1%
20%	67,0%	44,9%	30,1%	20,2%
25%	60,7%	36,8%	22,3%	13,5%
30%	54,9%	30,1%	16,5%	9,1%
35%	49,7%	24,7%	12,2%	6,1%
40%	44,9%	20,2%	9,1%	4,1%
45%	40,7%	16,5%	6,7%	2,7%
50%	36,8%	13,5%	5,0%	1,8%

Tabella: Probabilità di successo della trasmissione nel caso di una sequenza di ripetizioni multiple

Probabilità di successo della comunicazione con digipeating multiplo in funzione del traffico G nelle celle



La probabilità che il pacchetto arrivi a destinazione dipende quindi sia dal carico delle celle G che dal numero di celle N che il pacchetto deve attraversare per arrivare a destinazione.

Nella situazione di massimo carico possibile delle celle (G=50%, corrispondente al 23,8% di traffico utile considerando per ogni digipeater il disturbo arrecato da altri tre digipeaters interferenti) il pacchetto potrà raggiungere la cella adiacente con probabilità del 13,5%, e la successiva con probabilità 5%.



$$P = 0,368 \times 0,368 \times 0,368 = 0,05 = 5,0\%$$

Riducendo il carico della rete nelle celle al 15%, (corrispondente al 4,7% di traffico utile) l'affidabilità del digipeating multiplo verso la cella adiacente aumenterà al 54,9%, e verso quella immediatamente successiva al 40,7%.

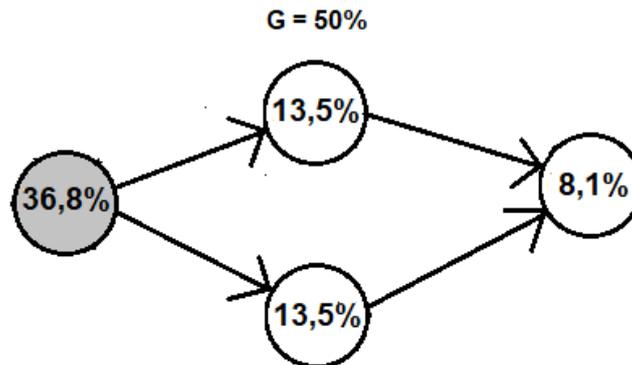


$$P = 0,741 \times 0,741 \times 0,741 = 0,407 = 40,7\%$$

Se per raggiungere il destinatario il pacchetto ripetuto percorrere più strade la probabilità di successo è maggiore perché la comunicazione diventa ridondante; ricordando che l'affidabilità di un sistema ridondante R è data da

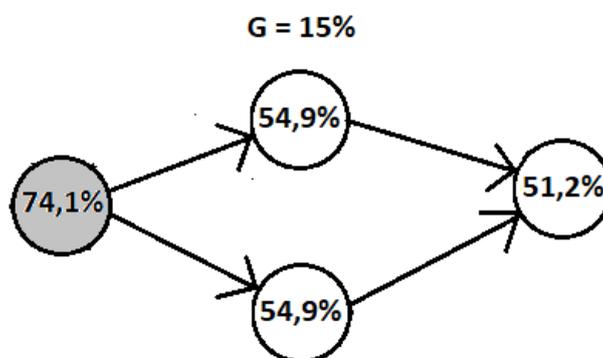
$$R = 1 - (1 - R_1) (1 - R_2) \dots (1 - R_N) ,$$

Nella situazione di massimo carico delle celle ($G=50\%$, $G_L=23,8\%$ con 3 digipeaters interferenti), riferendosi alla figura qui sotto e ricordando che i digipeaters sono tutti identici e caricati allo stesso modo, l'affidabilità complessiva (probabilità di successo) della comunicazione dalla cella più a sinistra alla cella più a destra (da utente trasmittente a utente ricevente) si potrà calcolare nel modo seguente:



$$\begin{aligned} P &= 0,368 \times [1 - (1 - 0,368)^2] \times 0,368 = \\ &= 0,368 \times 0,601 \times 0,368 = \\ &= 0,081 = 8,1\% \end{aligned}$$

Nella stessa situazione, riducendo il carico complessivo delle celle al 15% ($G_L = 4,7\%$ con 3 digipeaters interferenti) l'affidabilità complessiva della comunicazione aumenterà al 51,2%.



$$\begin{aligned} P &= 0,741 \times [1 - (1 - 0,741)^2] \times 0,741 = \\ &= 0,741 \times 0,933 \times 0,741 = \\ &= 0,512 = 51,2\% \end{aligned}$$

Osserviamo, come nuovamente ci aspettavamo, che il digipating multiplo ha discrete probabilità di successo solamente se il carico della rete è molto ridotto.

CAPITOLO 5 Nuovi assetti possibili

5.1 Premessa

L'analisi semplificata del funzionamento della rete APRS condotta nei capitoli precedenti suggerisce che il punto debole della rete attuale è costituito dall'interferenza che lo slot di uplink di ogni cella subisce da parte dei digipeaters adiacenti.

Ricercando nuove configurazioni che non soffrano di questo problema non si può ignorare la necessità del riuso delle apparecchiature esistenti (radio e TNC), possibilmente senza la necessità di effettuare modifiche: è molto difficile infatti pensare che gli utenti investano tempo e risorse economiche in una tecnologia superata come il packet radio.

Le soluzioni proposte nel presente capitolo cercano di aggirare il problema rinunciando al vincolo di una rete completamente isofrequenza, senza aumentare troppo – o non aumentando affatto – la complessità delle stazioni terminali e dei ripetitori.

5.2 Un intervento poco invasivo: aggiunta di un canale di ascolto

Un intervento poco invasivo potrebbe consistere nel dotare i digipeaters esistenti di una porta di solo ascolto in UHF, da utilizzare come porta di uplink aggiuntiva, lasciando invariato il funzionamento della rete isofrequenza in VHF a 144.800 MHz.

Le stazioni in campo potrebbero accedere alla rete in due modi:

- isofrequenza in VHF a 144.800 MHz, impiegando una radio in VHF e un TNC come ora;
- trasmettendo in UHF e ricevendo in VHF, impiegando un apparato bibanda e un solo TNC nel quale dovrebbero disabilitare il meccanismo di accesso al canale condiviso CSMA.

In questo modo il traffico ripetuto dai digipeaters non congestionerebbe più il canale di uplink in UHF, che per ciascuna cella potrebbe essere sempre impiegato al massimo della sua capacità per un accesso ALOHA ($G=50\%$, $S=18\%$).

Le stazioni che non desiderassero (o non potessero) adeguarsi alla nuova modalità di accesso continuerebbero ad utilizzare la rete APRS isofrequenza in VHF come prima.

La soluzione è interessante perché permetterebbe un passaggio graduale alla nuova configurazione.

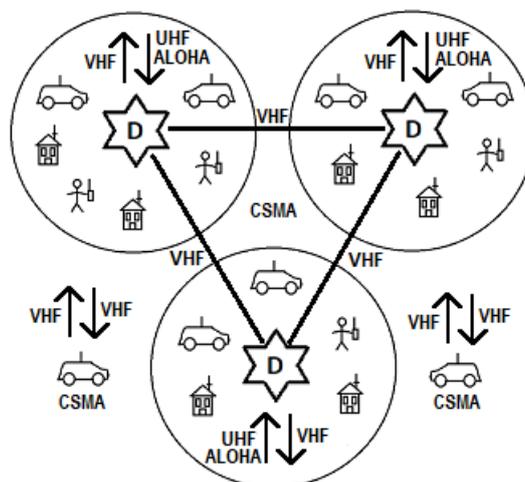


Figura: le stazioni in campo trasmettono in UHF, il digipeating avviene in VHF. Le stazioni che desiderano accedere alla rete come prima, isofrequenza in VHF, possono continuare a farlo.

Bisogna sottolineare però che al miglioramento delle prestazioni dell'uplink, comunque strategico data la debole potenza delle stazioni terminali, corrisponde una maggior saturazione della rete in VHF con ripercussioni negative sulle comunicazioni tra i digipeaters.

Inoltre le stazioni che trasmettono in UHF devono accettare la perdita di informazione causata dal fatto di non poter ascoltare il canale di downlink in VHF quando trasmettono. Questa perdita tuttavia è molto limitata e non costituisce un grave problema perché la trasmissione dei pacchetti è sporadica e di breve durata (ha carattere impulsivo).

5.3 Maggiore efficienza: una rete articolata su due livelli gerarchici

Una soluzione più efficiente è quella di articolare la rete su due livelli gerarchici distinti, un livello inferiore (LAN) nel quale viene processato il traffico locale, e un livello superiore nel quale avviene l'interconnessione tra le reti locali (WAN).

Operativamente si può frammentare la rete in tante celle indipendenti operanti a frequenze diverse (ad esempio in UHF), ciascuna servita dal proprio digipeater. L'interconnessione tra le celle (WAN), che rende possibile il digipeating multiplo, può avvenire su una frequenza separata, ad esempio in VHF.

Le stazioni in campo opererebbero isofrequenza in UHF con l'hardware e il software consueti; solo il digipeater sarebbe più complesso, dovendo essere dotato di due TNC, uno per la gestione della cella di appartenenza, abbinato a un ricetrasmittitore in UHF, l'altro per la comunicazione con gli altri digipeaters, abbinato a un ricetrasmittitore in VHF.

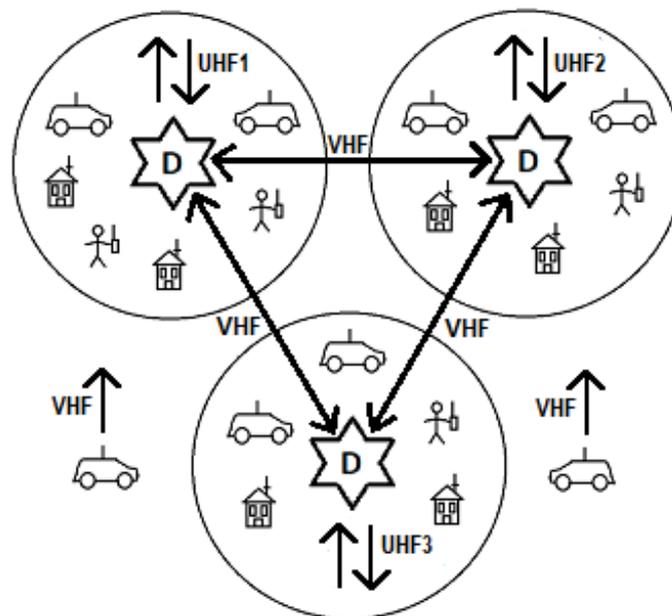


Figura: la rete, completamente via radio, articolata in celle indipendenti in UHF e interconnessa in VHF. Alcune stazioni, che desiderano solamente essere tracciate, possono accedere alla rete in VHF.

In questa configurazione il traffico tra digipeaters (trasferimento dati tra celle diverse) non interferisce con il traffico locale né in uplink né in downlink: le stazioni terminali ascoltano solamente il proprio digipeater e non sono disturbate né dalle stazioni né dai digipeaters delle celle vicine.

All'interno di ciascuna cella il throughput può raggiungere il 15,5% della capacità del canale trasmissivo per un traffico pari al 42,2% della capacità complessiva del canale. Celle adiacenti operano su frequenze UHF diverse per non interferirsi, ma può avvenire il riuso delle frequenze per celle sufficientemente lontane da non ascoltarsi mutuamente.

Al livello gerarchico superiore (WAN) il traffico tra digipeaters è ridotto ai soli pacchetti per i quali è richiesto il digipeating multiplo, con grande beneficio per il throughput e l'affidabilità delle comunicazioni dell'intera rete.

La diffusione delle informazioni all'interno della rete avviene nel modo seguente: i pacchetti trasmessi con path WIDE1-1 rimangono confinati all'interno della cella, i pacchetti per i quali è richiesta una diffusione più ampia vengono invece ripetuti in VHF decrementando progressivamente il contatore delle ripetizioni e ritrasmessi in UHF nelle celle di transito, fino all'azzeramento del contatore.

Le stazioni mobili che si spostano da una cella all'altra e che hanno solamente la necessità di essere tracciate (senza dover essere contattate) possono inoltrare il loro segnale direttamente in VHF al livello gerarchico superiore; in questo modo non hanno la necessità di doversi risintonizzare continuamente e hanno l'ulteriore vantaggio di trovare un canale molto meno trafficato perché libero dai traffici locali gestiti in UHF all'interno delle singole celle.

Giunte a destinazione possono sintonizzarsi sulla frequenza UHF della cella di arrivo e partecipare alle conversazioni in modo bidirezionale.

5.4 IGATES: Ascolto diffuso e broadcasting su canali distinti

Come abbiamo osservato nell'introduzione, attualmente internet gioca un ruolo importante nell'instradamento dei pacchetti APRS. Per ragioni strategiche, tuttavia, la rete rimane comunque potenzialmente in grado di operare esclusivamente via radio appoggiandosi ai digipeaters.

Se si rinuncia alla potenziale indipendenza dal web e si accetta di utilizzare esclusivamente internet per la raccolta e l'instradamento dei pacchetti, è possibile realizzare facilmente con l'hardware disponibile una configurazione particolarmente efficiente della rete APRS che potremmo definire di "ascolto diffuso e broadcasting".

La ricezione dei pacchetti trasmessi dalle stazioni in campo avverrebbe da parte di numerose stazioni IGATES esclusivamente riceventi disseminate sul territorio, che realizzerebbero una "rete isofrequenza di ascolto diffuso".

La rete APRS-IS svolgerebbe la funzione di collettore di tutti i pacchetti trasmessi in campo e di instradamento verso altre stazioni IGATES esclusivamente trasmittenti che effettuerebbero il broadcasting dei pacchetti di interesse locale su una frequenza diversa.

In questa configurazione non verrebbero quindi utilizzati i digipeaters isofrequenza che, come abbiamo visto, sono la principale causa del degrado delle prestazioni della rete APRS.

I vantaggi sarebbero numerosi:

- non avvenendo il digipeating (né il broadcasting in generale) dei segnali sulla frequenza di ascolto, il canale d'ascolto sarebbe molto meno trafficato, con notevole beneficio per il throughput complessivo;
- distribuendo in modo capillare stazioni IGATES riceventi con piccola area di copertura, sarebbe possibile ridurre il numero di stazioni ascoltate e quindi di collisioni rilevate;
- pacchetti che collidono per un IGATE ricevente potrebbero essere correttamente ricevuti da IGATES riceventi vicini (fenomeno della "reception diversity").

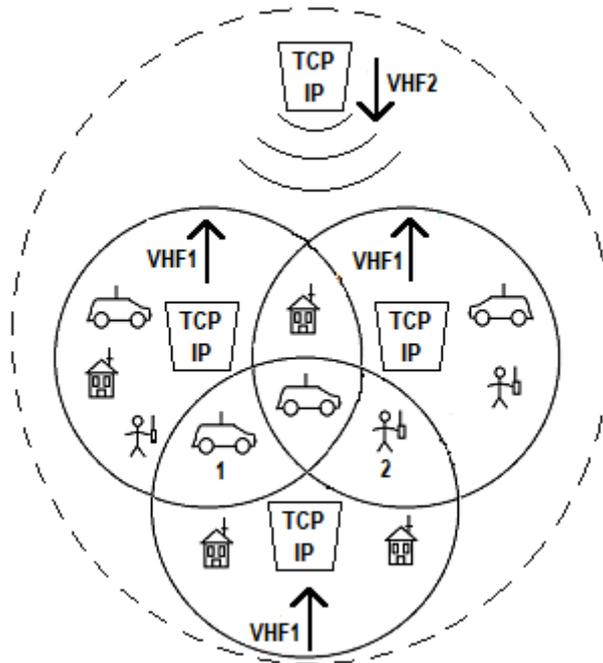


Figura: le stazioni 1 e 2, che trasmettono contemporaneamente, collidono per l'IGATE ricevente in basso ma non per i due IGATES riceventi più in alto. L'IGATE trasmittente irradia il suo segnale nell'area delle tre celle.

Gli IGATES trasmittenti, ubicati in posizioni geografiche privilegiate e diverse dagli IGATES riceventi, potrebbero operare su una frequenza diversa nella stessa banda degli IGATES riceventi.

Ritrasmetterebbero solamente il traffico delle celle IGATES riceventi che sottendono, più i pacchetti per i quali è richiesto il digipeating multiplo, sostituendosi a tutti gli effetti ai digipeaters, con la differenza che il trasferimento dei pacchetti tra celle trasmittenti avverrebbe via internet e non via radio.

Per condividere il canale di trasmissione, IGATES trasmittenti vicini utilizzerebbero il protocollo CSMA 1-persistente, IGATES lontani semplicemente non si ascolterebbero tra di loro.

Poter operare IGATES trasmittenti e riceventi sulla stessa banda permetterebbe alle stazioni in campo di utilizzare l'equipaggiamento attuale impostando semplicemente un offset tra trasmissione e ricezione, senza necessità di ricorrere ad apparati bibanda.

Anche in questo caso le stazioni terminali accetterebbero la piccola perdita di informazione nei brevi istanti in cui trasmettono.

Naturalmente il traffico potrebbe sempre anche essere visualizzato su internet come avviene ora.

Si potrebbero ottenere prestazioni ancora superiori operando gli IGATES trasmettenti su frequenze diverse eliminando i problemi dell'accesso a contesa sul canale di downlink: in questo modo ciascun IGATE trasmettente potrebbe sfruttare la capacità del suo canale al 100%, potendo arrivare a trasmettere fino a 900 frames per ciclo di rete di 20 minuti alla velocità di 1200 bps con la massima affidabilità consentita dalla rumorosità del canale, corrispondenti ad esempio a 115 stazioni mobili che trasmettono ogni 5 minuti e 440 stazioni fisse che trasmettono ogni 20 minuti.

Simili IGATES trasmettenti potrebbero servire facilmente aree molto ampie o ad alta densità di stazioni.

Le stazioni fisse in campo dovrebbero sintonizzarsi sulla frequenza di downlink della propria area; le stazioni mobili potrebbero limitarsi a farsi tracciare mentre sono in movimento e, solamente giunte a destinazione, sintonizzarsi sulla frequenza di downlink della località di arrivo per comunicare in modo bidirezionale.

Simili soluzioni, sicuramente attuabili in teoria, pongono tuttavia problemi dal punto di vista pratico per quanto riguarda la disponibilità di connessioni internet in quota e in luoghi isolati, e di costo, perché richiedono un numero di connessioni ad internet molto elevato.

Una soluzione meno costosa è quella di realizzare celle IGATE bidirezionali con area di copertura intermedia, sacrificando in parte i benefici in termini di numero ridotto di collisioni che derivano da celle di ascolto piccole. Queste celle, ubicate in posizioni privilegiate per la copertura di un'area geografica limitata ma non isolate (torri di acquedotti, campanili, palazzi alti di pianura, qualunque abitazione privata in collina con una discreta visuale o all'interno di una valle di montagna) potrebbero avere facilmente accesso ad internet, e utilizzando la stessa connessione per il traffico in entrambe le direzioni permetterebbero di dimezzare il numero di connessioni necessarie, e quindi il costo complessivo.

Le celle opererebbero su frequenze distinte per la ricezione e la trasmissione come proposto nel modello precedente (una frequenza di ricezione e una di trasmissione) ma difficilmente potrebbero operare sulla stessa banda a causa delle interferenze che il trasmettitore eserciterebbe sul ricevitore presso l'IGATE. Per le stazioni in campo sarebbe perciò necessario utilizzare apparati bibanda. L'interconnessione tra le celle, naturalmente, avverrebbe via internet.

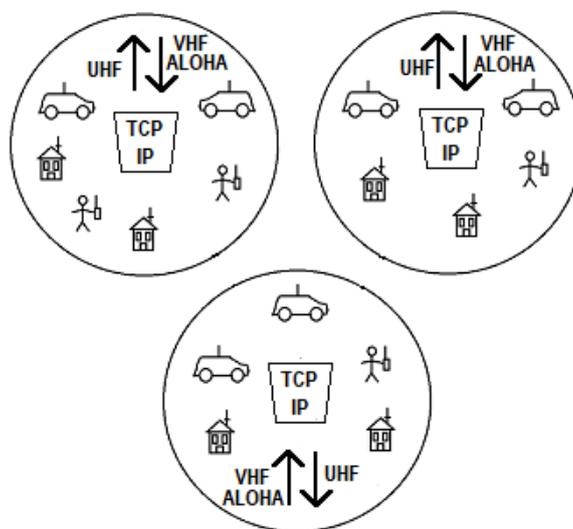


Figura: la rete, articolata in celle servite da IGATES bidirezionali e interconnessa via internet. Le stazioni in campo trasmettono in VHF non appena hanno un pacchetto da inviare e ricevono lo stream di dati del proprio IGATE.

CONCLUSIONI

L'analisi del semplice modello teorico proposto evidenzia i limiti del protocollo ALOHA: l'accesso casuale al canale condiviso condiziona pesantemente il throughput massimo, che non può in ogni caso superare il 18,4% del traffico totale in corrispondenza di un traffico G pari al 50% della capacità del canale, e la probabilità di successo della comunicazione in condizioni di massimo carico è limitata (36,8%). L'affidabilità della comunicazione migliora in condizioni di scarso traffico ma la percentuale di inutilizzo del canale diventa molto elevata, con conseguente notevole spreco di banda.

L'introduzione di un digipeater nella rete non riduce molto le prestazioni complessive in condizioni di massimo carico (throughput massimo 15,5% in corrispondenza di un traffico pari al 42,2% della capacità del canale), e ancora meno quando la rete è poco caricata.

La presenza di più digipeaters sulla stessa frequenza, necessaria per il digipeting multiplo, penalizza invece pesantemente le prestazioni delle singole celle e della rete nel suo complesso, limitando il numero massimo di stazioni, il throughput e l'affidabilità delle comunicazioni: la rete può garantire comunicazioni affidabili solo quando le stazioni in campo sono in numero molto limitato.

La ripetizione multipla dello stesso pacchetto lungo percorsi diversi aumenta l'affidabilità della comunicazione a spese di un aumento della congestione della rete.

Per migliorare le prestazioni è necessario rinunciare al vincolo di una rete completamente isofrequenza; è possibile dotare i digipeaters esistenti di una porta di uplink aggiuntiva lasciando invariato il funzionamento della rete isofrequenza attuale, ma la soluzione più efficiente che fa uso solamente di comunicazioni radio è quella di frammentare la rete in celle operanti su frequenze diverse e di articolare la rete su due livelli gerarchici distinti, locale e di interconnessione tra celle.

Se si accetta di utilizzare esclusivamente internet per la raccolta e l'instradamento dei pacchetti, rinunciando ai digipeaters, è possibile realizzare facilmente con l'hardware esistente configurazioni particolarmente performanti, ma la rete APRS diventa dipendente dal web e vulnerabile in caso di collasso dei normali canali di comunicazione, venendo meno alla funzione primaria di ausilio alla protezione civile per la quale era stata inizialmente concepita.

Le configurazioni individuate nelle pagine precedenti sono solo alcune delle soluzioni possibili; in ogni caso qualsiasi soluzione deve consentire il riuso delle apparecchiature esistenti per poter essere accettata dagli utenti.

Ci si potrebbe chiedere infine se abbia ancora senso occuparsi di una tecnologia superata come l'APRS - e il packet radio in generale - sicuramente molto limitata rispetto agli standard attuali; se questa domanda è lecita per quanto riguarda le prestazioni, rimane il fatto che l'APRS e il packet radio sono ancora oggi un valido strumento per la sperimentazione e l'istruzione personale.

Bibliografia

- W. Beech, D.Nielsen, J.Taylor “AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio”, TAPR 1988
- R.Finch, S.Avent, “A duplex packet radio repeater approach to layer one efficiency”, 1987
- H.P. Van Tonder “Channel Throughput Enhancement of an Automatic Position Reporting System Network with MAC Layer Protocol Optimization”
- H.P. Van Tonder , “Improving Automatic Position Reporting System (APRS) Throughput and Reliability”, University of Stellenbosch, Dec 2004
- P. Loveall, “How APRS Works”, 2005 (PPT)
- B. Zielinski, “Effective throughput of AX.25 protocol”, Bulletin of the Polish Academy of sciences, Vol. 61, No. 3, 2013
- Maher H. Heal, “A Comment on the Throughput of Non-persistent CSMA”, Abu Dhabi University
- Paulette Altmaier, “A Short Tutorial on CSMA”, May 1991
- “K.W. Finnegan, “Examining Ambiguities in the Automatic Packet Reporting System”, December 2014
- The APRS Working Group , “Aprs protocol reference v.1.0”, August 2000
- Kenwood corporation, “APRS”, 1999
- Claire Goursaud, Yuqi Mo, “Random Unslotted Time-Frequency ALOHA: Theory and Application to IoT UNB Networks”, 23rd International Conference on Telecommunications (ICT) , May 2016, Thessaloniki, Greece
- Sandro Petrizzelli, “Appunti di reti di telecomunicazioni”, cap 5 - protocolli di linea (parte II)
- Renato Lo Cigno, “Reti - Livello Collegamento: Data-Link e Medium Access Control”, Università di Trento