συστήματος του υπολογιστή. Επειδή η ανίχνευση σφαλμάτων επιπέδου μεταφοράς υλοποιείται με λογισμικό, είναι σημαντικό να έχετε ένα απλό και γρήγορο σχήμα ανίχνευσης σφάλματος, όπως το άθροισμα ελέγχου. Από την άλλη, η ανίχνευση σφάλματος στο επίπεδο ζεύξης υλοποιείται σε αποκλειστικό υλικό μέσα σε προσαρμογείς, το οποίο μπορεί να εκτελέσει ταχέως τις πιο περίπλοκες πράξεις του CRC. Ο Feldmeier [Feldmeier 1995] παρουσιάζει ταχείες τεχνικές υλοποίησης με λογισμικό όχι μόνον για κώδικες σταθμισμένου αθροίσματος ελέγχου, αλλά και για CRC (βλ. παρακάτω) και άλλους κώδικες.

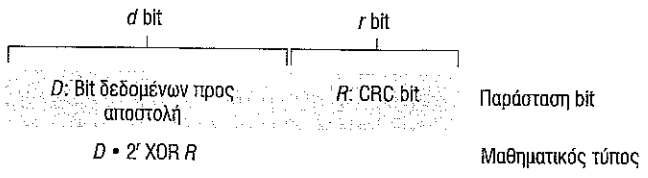
### 5.2.3 Έλεγχος Κυκλικού Πλεονασμού (CRC)

Μία τεχνική ανίχνευσης σφαλμάτων που χρησιμοποιείται ευρέως στα σημερινά δίκτυα υπολογιστών βασίζεται σε **κώδικες ελέγχου κυκλικού πλεονασμού** (**cyclic redundancy check, CRC, codes**). Οι κώδικες CRC είναι επίσης γνωστοί ως **πολυωνυμικοί κώδικες** (**polynomial codes**), αφού είναι δυνατόν να προβάλετε το bit string, που θα σταλεί ως ένα πολυώνυμο, οι συντελεστές, του οποίου είναι οι τιμές 0 και 1 μέσα στο bit string, με τις πράξεις στο bit string να ερμηνεύονται ως πολυωνυμική αριθμητική.

Οι κώδικες CRC λειτουργούν ως εξής. Θεωρήστε το τμήμα δεδομένων $d$-bit, $D$, που θέλει να στείλει ο κόμβος αποστολής στον κόμβο λήψης. Ο αποστολέας και ο παραλήπτης πρέπει πρώτα να συμφωνήσουν σ' ένα μοτίβο bit $r+1$, γνωστό ως **γεννήτρια** (**generator**), το οποίο θα συμβολίσουμε με $G$. Θα απαιτήσουμε το πλέον σημαντικό (αριστερότερο) bit του $G$ να είναι 1. Η βασική ιδέα πίσω από τους κώδικες CRC φαίνεται στην Εικόνα 5.6. Για ένα δεδομένο τμήμα δεδομένων, $D$, ο αποστολέας θα επιλέξει $r$ πρόσθετα bit, $R$ και θα τα προσαρτήσει στο $D$, έτσι ώστε η προκύπτουσα παράσταση με $d+r$ bit (που ερμηνεύεται ως ένας δυαδικός αριθμός) να διαιρείται ακριβώς με το $G$ χρησιμοποιώντας αριθμητική modulo 2. Η διαδικασία ελέγχου σφάλματος με το CRC είναι έτσι απλή: Ο παραλήπτης διαιρεί τα λαμβανόμενα $d+r$ bit διά $G$. Εάν το υπόλοιπο δεν είναι μηδέν, ο παραλήπτης γνωρίζει ότι συνέβη ένα σφάλμα. Αλλιώς τα δεδομένα γίνονται αποδεκτά, ως σωστά.

Όλοι οι υπολογισμοί CRC γίνονται με αριθμητική modulo 2 χωρίς κρατούμενα στην πρόσθεση και στην αφαίρεση. Αυτό σημαίνει ότι η πρόσθεση και η αφαίρεση είναι πανομοιότυπες και είναι και οι δύο ισοδύναμες με το bitwise αποκλειστικό OR (XOR) των τελεστέων. Έτσι, για παράδειγμα,

```
1011 XOR 0101 = 1110
1001 XOR 1101 = 0100
```




**Εικόνα 5.6** ♦ Κώδικες CRC.

Επίσης, έχουμε παρόμοια

```
1011 – 0101 = 1110
1001 – 1101 = 0100
```

Ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση είναι ίδιες πράξεις με την αριθμητική με βάση το 2, εκτός του ότι η απαιτούμενη αφαίρεση ή πρόσθεση γίνεται χωρίς κρατούμενα. Όπως στην κανονική δυαδική αριθμητική, ο πολλαπλασιασμός επί $2^k$ ολισθαίνει αριστερά μία παράσταση bit κατά $k$ θέσεις. Έτσι, δεδομένων των $D$ και $R$, η ποσότητα $D \cdot 2^r$ XOR $R$ δίνει την παράσταση από $d + r$ bit, που φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Θα χρησιμοποιήσουμε αυτήν την αλγεβρική έκφραση για το παράσταση από $d + r$ bit απ' την Εικόνα 5.7, στην συζήτησή μας παρακάτω.

Τώρα, ας γυρίσουμε στην κρίσιμη ερώτηση του πώς το αποστολέας υπολογίζει το $R$. Θυμηθείτε ότι θέλουμε να βρούμε το $R$, έτσι ώστε να υπάρχει ένα $n$, ώστε:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

Αυτό σημαίνει ότι θέλουμε να επιλέξουμε το $R$, έτσι ώστε το $D$ να διαιρείται από το $D \cdot 2^r$ XOR $R$ χωρίς υπόλοιπο. Εάν κάνουμε XOR (δηλ. προσθέσουμε το modulo 2 χωρίς κρατούμενο) στο $R$ και στις δύο πλευρές της παραπάνω εξίσωσης, παίρνουμε:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

Αυτή η εξίσωση μας λέει ότι εάν διαιρέσουμε το $D \cdot 2^r$ διά $G$, η τιμή του υπολοίπου είναι ακριβώς $R$. Με άλλα λόγια, μπορούμε να υπολογίσουμε το $R$ ως:

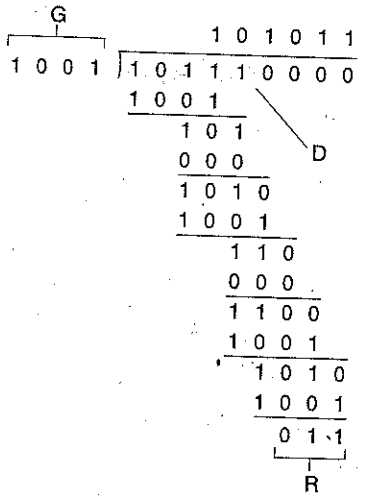
$$R = \text{υπόλοιπο } \frac{D \cdot 2^r}{G}$$

Η Εικόνα 5.7 δείχνει αυτόν τον υπολογισμό για την περίπτωση που $D = 101110$, $d = 6$, $G = 1001$ και $r = 3$. Τα εννέα bit που μεταδίδονται σ' αυτήν την περίπτωση είναι 101110011. Πρέπει να ελέγξετε αυτούς τους υπολογισμούς μόνοι σας και επίσης να ελέγξετε ότι όντως $D \cdot 2^r = 101011 \cdot G$ XOR $R$.

Έχουν ορισθεί διεθνή πρότυπα για γεννήτριες 8-, 12-, 16– και 32-bit. Το πρότυπο 32-bit, CRC-32, που έχει υιοθετηθεί σε αρκετά πρωτόκολλα IEEE επιπέδου ζεύξης, χρησιμοποιεί μία γεννήτρια

$$G_{\text{CRC-32}} = 100000100110000010001110110110111$$

Κάθ' ένα απ' τα πρότυπα CRC μπορεί να ανιχνεύσει σφάλματα ριπής με λιγότερα από $r + 1$ bit. (Αυτό σημαίνει ότι όλα τα συνεχόμενα bit σφάλματος που έχουν μήκος $r$ bit ή λιγότερα θα ανιχνευθούν). Ακόμη, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μία ριπή μήκους μεγαλύτερου των $r + 1$ bit ανιχνεύεται με πιθανότητα $1 - 0{,}5^r$. Επίσης, κάθε πρότυπο CRC μπορεί να ανιχνεύσει οποιονδήποτε περιττό αριθμό σφαλμάτων bit. Βλ. [Williams 1993] για μία συζήτηση υλοποίησης ελέγχων CDR. Η θεωρία πίσω από τους κώδικες CRC και ακόμη πιο ισχυρούς κώδικες είναι πέρα από τα όρια αυτού του κειμένου. Το βιβλίο [Schwartz 1980] παρέχει μία εξαίρετη εισαγωγή σ' αυτό το θέμα.




**Εικόνα 5.7** ♦ Ένα δείγμα υπολογισμού CRC.

## 5.3 Πρωτόκολλα και Ζεύξεις Πολλαπλής Προσπέλασης

Στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, σημειώσαμε ότι υπάρχουν δύο τύποι ζεύξεων δικτύου: ζεύξεις σημείου-προς-σημείο και ζεύξεις εκπομπής. Μία **ζεύξη σημείου-προς-σημείο** (**point-to-point link**) αποτελείται από έναν μόνον αποστολέα στο ένα άκρο της ζεύξης και έναν μόνον παραλήπτη στο άλλο άκρο της ζεύξης. Πολλά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης έχουν σχεδιασθεί για ζεύξεις σημείου-προς-σημείο· το PPP (Point-to-Point-Protocol) και το HDCL (High-level Data Link Control) είναι δύο τέτοια πρωτόκολλα, τα οποία θα καλύψουμε παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο. Ο δεύτερος τύπος ζεύξης, μία **ζεύξη εκπομπής** (**broadcast link**), μπορεί να έχει πολλαπλούς κόμβους αποστολής και λήψης, όπου όλοι είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο, μοναδικό κανάλι εκπομπής κοινής χρήσης. Ο όρος *εκπομπή* (*broadcast*) χρησιμοποιείται εδώ, επειδή όταν ένας κόμβος μεταδίδει ένα πλαίσιο, το κανάλι κάνει εκπομπή του πλαισίου και κάθε ένας από τους άλλους κόμβους λαμβάνει ένα αντίγραφο. Το Ethernet και τα ασύρματα LAN είναι παραδείγματα τεχνολογιών εκπομπής επιπέδου ζεύξης. Σε αυτήν την ενότητα θα κάνουμε ένα βήμα πίσω από τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης και θα εξετάσουμε πρώτα ένα πρόβλημα βασικής σημασίας για το επίπεδο ζεύξης δεδομένων: πώς να συντονίσετε την προσπέλαση πολλαπλών κόμβων εκπομπής και λήψης προς ένα κανάλι εκπομπής κοινής χρήσης – το καλούμενο **πρόβλημα πολλαπλής προσπέλασης** (**multiple access problem**). Τα κανάλια εκπομπής συχνά χρησιμοποιούνται σε δίκτυα τοπικής περιοχής (LAN) (local area networks, LAN), δίκτυα που είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένα μέσα σε ένα κτίριο (ή μέσα σ' ένα συγκρότημα εταιρείας ή πανεπιστημίου). Έτσι, θα εξετάσουμε επίσης πώς χρησιμοποιούνται τα κανάλια πολλαπλής προσπέλασης σε LAN, στο τέλος αυτής της ενότητας.