

Aleatorizarea secvenței de date

Necesitatea

- în cazul semnalelor PSK semnalul modulat cu saltul de fază $\Delta\Phi = 0^\circ$ nu conține informație de sincronizare, iar apariția unei secvențe lungi de biți ce generează o serie de astfel de salturi consecutive, poate duce la pierderea sincronismului dintre tactul local de simbol și semnalul recepționat
- secvențele repetitive de date generează un spectru al semnalului modulat ce conține linii spectrale de amplitudine destul de mare; în cazul transmisiei prin amplificatoare RF neliniare, datorită fenomenului de "refacere spectrală" (vezi capitolul „Parametrii canalelor radio”), aceste linii spectrale introduc componente spectrale persistente în exteriorul benzii semnalului util, afectând canalele de transmisiune învecinate.
- tot datorită neliniarității amplificatoarelor RF, prezența repetitivă a acelorași componente spectrale cu amplitudine mare conduce la distorsionarea semnalului util prin apariția produselor de intermodulație în interiorul benzii de frecvență permise, afectând datele demodate și recuperarea tactului de simbol în receptor.
- pentru reducerea acestor inconveniente se introduce în emițător o operație de aleatorizare a secvenței de date de emisie, operație ce previne apariția secvențelor repetitive de date.
- în transmisiile OFDM, aleatorizarea secvenței de date de intrare duce la utilizarea tuturor simbolurilor modulatorie cu aproximativ aceeași probabilitate pe toate subpurtătoarele modulate, micșorând astfel variația anvelopei și valoarea instantanee a PAPR ale semnalului modulat. Aceasta conduce la scăderea nivelului interferențelor introduse în benzile de frecvență învecinate și la un grad mai redus de distorsionare al semnalului transmis.
- operația de aleatorizare a datelor de emisie este realizată de un circuit numit scrambler, de unde și denumirea de "scramblare" întâlnită uneori, plasat între intrarea în emițător și intrarea în modulator.
- deoarece prin această operație secvența de date modulate, și implicit cea de date demodate, nu mai coincide cu secvența originală de date livrată de calculatorul emițător, la recepție este necesară refacerea secvenței originale din cea aleatorizată. Această operație este executată, după legea inversă celei folosite la aleatorizare, de către un circuit numit descrambler, care este plasat la ieșirea demodulatorului.

Scramblerul

- operația de aleatorizare a datelor de emisie se bazează pe generarea unei secvențe pseudoaleatoare (SPA), care depinde de semnalul de date aleatorizat, care este adunată modulo 2 cu acestea, așa cum se arată în figura 1.a, care prezintă schema de principiu simplificată a scramblerului folosit în modemul definit de standardul ITU-T V. 27.
- SPA este generată de un registru de deplasare (RD), având reacțiile conectate în conformitate cu coeficienții unui polinom generator $g(x)$, prim în câmpul $GF(2)$. Datorită adunării secvenței de date cu SPA (vezi fig. 1.a), lungimea acestei secvențe nu mai este $L=2^n-1$, unde n e gradul polinomului generator, dar efectul de aleatorizare se manifestă pe această lungime.

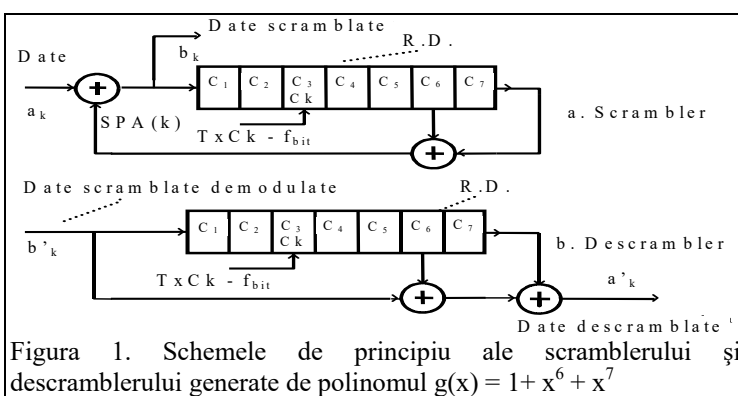


Figura 1. Schemele de principiu ale scramblerului și descramblerului generate de polinomul $g(x) = 1 + x^6 + x^7$

- polinomul generator al scramblerului din fig. 1.a e dat de (1), unde prin x^k s-a notat retardarea unui bit cu k perioade ale tactului de bit.

$$g(x) = 1 \oplus x^6 \oplus x^7 \quad (1)$$

- expresia bitului scramblat b_k , în funcție de bitul de date a_k și de biții scramblați cu 6 și respectiv 7 perioade de tact înainte, este:

$$b_k = a_k \oplus b_{k-6} \oplus b_{k-7} \quad (2)$$

- pentru a demonstra efectul de aleatorizare a datelor introdus de operația de scrambling, vom considera că probabilitățile de apariție a biților

"0" și "1" în secvența de date de emisie a_k sunt diferite, (3.a, b), pentru că altfel, probabilitatea de apariție a secvențelor repetitive ar fi extrem de redusă.

- mai considerăm că probabilitățile de apariție ale celor două tipuri de biți în secvența SPA sunt aproximativ egale, așa cum se arată în (3.c).

$$p_a(0) \neq p_a(1) \quad - a.; \quad p_a(0) + p_a(1) = 1 \quad - b.; \quad p_{SPA}(0) \approx p_{SPA}(1) \approx 0,5 \quad - c.; \quad (3)$$

- bitul "1" apare în secvența b_k de date aleatorizată în două situații:

- dacă $a_k = "0"$ și $SPA_k = "1"$ sau dacă $a_k = "1"$ și $SPA_k = "0"$;

- în aceste ipoteze, probabilitatea de apariție a bitului "1" în secvența de date aleatorizată, $p_b(1)$, este dată de:

$$p_b(1) = p_a(0) \cdot p_{SPA}(1) + p_a(1) \cdot p_{SPA}(0); \quad (4)$$

- ținând cont de relațiile (3.b, .c), relația (4) devine:

$$p_b(1) = p_{SPA}(1)[p_a(0) + p_a(1)] = p_{SPA}(0) \approx 0,5; \quad (5)$$

ceea ce arată că în secvența de date scramblate, cele două valori logice au aproximativ aceleași probabilități de apariție, deci putem considera datele aleatorizate pe o lungime $L = 2^n - 1 = 127$ biți.

Descramblerul

- operația inversă aleatorizării, numită și descramblare, se bazează pe relația (5) și se efectuează conform relației (6), iar schema de principiu a circuitului descrambler este prezentată în figura 1.b.

$$a_k = b_k \oplus b_{k-6} \oplus b_{k-7}; \quad (6)$$

Circuitele auxiliare ale scramblerului

- analizele efectuate au arătat că sistemul de recuperare a tactului de simbol al receptorului descris de avizul V.27 ITU-T este afectat de apariția unei serii mai lungi de n ($n = 7$) biți scramblați $b_k = "0"$.

- de asemenea aceste serii generează componente spectrale care, la trecerea prin amplificatorul neliniar, pot genera efectele nedorite menționate mai sus, o perioadă prea mare de timp.

- pentru evitarea acestei situații scramblerul trebuie să conțină un circuit auxiliar care, la sesizarea a șapte biți consecutivi $b_k = "0"$, să inverseze ultimul bit al acestei secvențe.

- descramblerul ar trebui să conțină și el un circuit care, sesizând șase biți consecutivi scramblați având valoarea "0", să inverseze următorul bit de la intrarea descramblerului.

- pe baza unor analize mai aprofundate, atât a secvențelor de date cât și a sistemului de recuperare a tactului de simbol și a componentei spectrale a semnalului modulat, avizul ITU-T V.27 prevede că secvența de ieșire (scramblată) să fie supravegheată pe o lungime $M = 45$ biți, în căutarea unor secvențe care au proprietățile:

$$b_i = b_{i+9}; \text{ sau } b_i = b_{i+12}; \quad (7)$$

- dacă apare o astfel de secvență, atunci cel de-al 42-lea sau cel de-al 45-lea bit este inversat înaintea transmisiei.

- supravegherea condiției date de prima egalitate (7) face ca repetarea secvențelor de trei sau a celor de nouă biți să nu aibă loc pe o lungime mai mare de 42 biți.

- supravegherea condiției date de a două egalitate (7) face ca repetarea secvențelor de patru, șase sau doisprezece biți să nu aibă loc pe lungime mai mare de 45 biți.

- polinomul generator, ecuațiile de definire a secvențelor ale căror repetări trebuie evitate și lungimile pachetelor de date pe care repetările acestor secvențe trebuie evitate, sunt specifice fiecărui tip de modem și sunt date în standardul ce descrie tipul respectiv de modem. Implicit, și structurile scramblerului-descramblerului și ale circuitelor auxiliare diferă la fiecare tip de modem și sunt, de cele mai multe ori, descrise în detaliu în standardele respective.

- modemurile care folosesc egalizor adaptiv necesită o serie de secvențe de antrenare care trebuie scramblate sau nu, în funcție de egalizorul folosit.

- scramblerele acestor tipuri de modemuri conțin și alte circuite auxiliare destinate egalizorului automat, circuite care sunt specifice fiecărei clase de modemuri, fiind și ele descrise de standardul respectiv.

Efectul de multiplicare a erorilor de bit

- ecuația (6) arată că eronarea unui bit, din 8 biți demodulați consecutivi, duce, după descramblare, la apariția a trei biți eronați datorită utilizării bitului eronat la descramblarea a încă doi biți demodulați ulterior.

- pentru a ilustra acest fapt presupunem că bitul b_k este decodat eronat, iar cei șapte biți anteriori, b_{k-1}, \dots, b_{k-7} , și cei șapte biți ulteriori, b_{k+1}, \dots, b_{k+7} sunt decodați corect.

- atunci, prin aplicarea relației (6), descramblerul va furniza biții eronați a'_k, a'_{k+6} și a'_{k+7} :

$$b'_k = b_k \oplus 1 \Rightarrow \begin{cases} t = k \cdot T_b & a'_k = b_k \oplus 1 \oplus b_{k-6} \oplus b_{k-7} = a_k \oplus 1 \\ t = (k+6) \cdot T_b & a'_{k+6} = b_{k+6} \oplus b_{k+6-6} \oplus 1 \oplus b_{k+6-7} = a_{k+6} \oplus 1 \\ t = (k+7) \cdot T_b & a'_{k+7} = b_{k+7} \oplus b_{k+7-6} \oplus b_{k+7-7} \oplus 1 = a_{k+7} \oplus 1 \end{cases} \quad (8)$$

- generalizând, observăm că numărul biților ce vor fi eronați de către descrambler, din $2n$ biți consecutivi descramblați, datorită eronării la demodulare a unui singur bit, este egal cu numărul conexiunilor registrului de deplasare.

- deoarece numărul conexiunilor registrului este egal cu p , numărul coeficienților nenuli ai polinomului generator al scramblării, rezultă că dintre polinoamele generatoare (prime) de grad n , se va alege polinomul cu cel mai mic număr de coeficienți nenuli. De obicei, numărul minim al coeficienților nenuli este $p = 3$.

- dacă la emisie se utilizează precodarea diferențială, caz în care eronarea unui simbol produce eronarea

simbolului următor datorită decodării diferențiale, putem avea pachete de până la $p \cdot b$ erori de bit, b fiind numărul de biți/simbol.

- în procesul de descramblare, acești biți eronați vor afecta și descramblarea biților următori, dar, datorită reacțiilor registrului de deplasare, unele din aceste erori se pot anula reciproc. Rezultă că, în acest caz, factorul de multiplicare a erorilor de bit depinde atât de structura secvenței de date scramblate, cât și de tipul erorii de simbol apărute, în condițiile aceluiași polinom generator al scramblării.

- ca exemplu, studiile arată că, în cazul descramblării datelor transmise cu constelația DPSK A8 și a utilizării polinomului de scramblare dat de (1), la eronarea unui simbol pot apărea de la cinci erori, în cazul cel mai favorabil, până la treisprezece erori, în cazul cel mai defavorabil.

- descramblerul poate introduce erori suplimentare și datorită erorilor ce au apărut în secvențele repetitive, erori care conduc la neinversarea bit inversat de scrambler, datorită acestor secvențe repetitive.