

APPLICATIONS OF REED-SOLOMON CODES IN TELECOMMUNICATIONS ¹¹

Dimitar Stoyanov, PhD Student

Department of Telecommunications,
University of Ruse "Angel Kanchev"
Tel.: 00359 82 888 734
E-mail: dstoyanov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Adriana Borodzhieva, PhD

Department of Telecommunications,
University of Ruse "Angel Kanchev"
Tel.: 00359 82 888 734
E-mail: aborodzhieva@uni-ruse.bg

Abstract: The paper explores the diverse applications of Reed-Solomon codes, widely recognized as one of the most effective error-correcting codes in digital systems. These codes are crucial in data storage, barcodes, data transmission, and space telecommunications, ensuring reliable communication and data integrity in environments prone to noise and errors. The document highlights their use in CDs, DVDs, QR codes, space missions, and even high-speed computing systems, showcasing their versatility and future potential in evolving communication and storage technologies.

Keywords: Reed-Solomon codes, Error correction, Data storage and transmission, Barcodes, Space telecommunications, Reliability.

ВЪВЕДЕНИЕ

На 21 януари 1959 г. Ървинг Рийд (Irving Reed) и Гюс Соломон (Gus Solomon) подават статия в списанието на Дружеството за индустриална и приложна математика (Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics). През юни 1960 г. статията е публикувана: пет страници под доста непретенциозното заглавие „Полиномиални кодове над някои крайни полета“ (“Polynomial Codes over Certain Finite Fields”) (Reed, I. S., & Solomon, G., 1960). Тази статия описва нов клас кодове за коригиране на грешки, които сега се наричат кодове на Рийд-Соломон.

През десетилетията след откриването им, кодовете на Рийд-Соломон са се радвали на безброй приложения, от плейъри за компакт дискове във всекидневните до космически кораби, които сега са далеч отвъд орбитата на Плутон. Кодовете на Рийд-Соломон са неразделна част от телекомуникационната революция през последната половина на двадесети век (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).

Докладът разглежда разнообразните приложения на кодовете на Рийд-Соломон в съвременните технологии. Тези мощни алгоритми за корекция на грешки намират широко приложение в системи за съхранение и предаване на данни, баркодове, космически телекомуникации, мобилни комуникации и суперкомпютри. Техните свойства гарантират надеждност и ефективност в разнообразни среди, от компакт дискове до мрежи с разширен спектър и оптични канали, като ги утвърждават като основен инструмент в борбата с грешките в цифровите системи (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).

¹¹ Докладът е представен на 25 октомври 2024 г. в секция „Комуникационна и компютърна техника“ с оригинално заглавие на български език: ПРИЛОЖЕНИЯ НА КОДОВЕТЕ НА РИЙД-СОЛОМОН В ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИТЕ

ИЗЛОЖЕНИЕ

Съхранение на данни и цифрови аудио дискове

Със сигурност може да се твърди, че кодовете на Рийд-Соломон са най-често използваните цифрови кодове за контрол на грешки в света. Кодирането на Рийд-Соломон е широко използвано в системите за съхранение на данни, чиято цел е коригиране на пакетни грешки, породени от дефекти на носителя. Това твърдение се основава на факта, че цифровите аудио или компактдискове (compact discs, CD) (Фиг. 1) използват кодовете на Рийд-Соломон за откриване и коригиране на грешки. Immink описва как цифровите аудио системи използват кодовете на Рийд-Соломон и как специалните свойства на кодовете на Рийд-Соломон правят качеството на звука на компактдиска толкова впечатляващо, колкото е (съотношението сигнал/шум на изхода надвишава 90 dB) (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).



Фиг. 1. Цифрови аудио дискове

Системата на компактдиска използва двойка кръстосано-преплетени Рийд-Соломон кодове. Тъй като кодовете на Рийд-Соломон са недвоичен код, всеки символ на кодовата дума се превръща в низ от битове, когато се предава през двоичен канал. В случай на поява на шум, някои от битовете се променят, което води до погрешното им приемане. Целта на кода на Рийд-Соломон е тези битови грешки да бъдат открити и коригирани. При всяка поява на шум, водеща до битови грешки, декодерът на Рийд-Соломон коригира единствено грешките в символите, където те са настъпили, без да засяга останалите символи, в които информацията е предадена правилно.

Кодовете на Рийд-Соломон могат да коригират и липсващата, загубена или изтрита информация по ефективен начин. Системата за контрол на грешките на компактдисковете използва първия от кръстосано-преплетените кодове на Рийд-Соломон, за да открива липсваща информация. След това системата използва втория код, за да коригира липсата. Това брилянтно инженерство позволява точното възпроизвеждане на звука въпреки несъвършенствата на материала и повредата на повърхността на диска.

В системата на компактдиска кръстосано вплетеният код на Рийд-Соломон (Cross-Interleaved Reed-Solomon Coding, CIRC) осигурява откриване на грешки и коригиране на грешки. CIRC добавя към всеки три байта данни един излишен паритетен байт. Кодовете на Рийд-Соломон са особено полезни в борбата със случайни и пакетни грешки. CIRC коригира пакети грешки до 4000 бита данни в последователност (с дължина 2,5 mm върху повърхността на CD) и компенсира пакети грешки до 12 000 бита (7,5 mm), които могат да бъдат причинени от малки драскотини. Това прави този код толкова добър, че повечето грешки, получени при възпроизвеждане на компакт диска, са причинени по-скоро от грешки при движението на лазера по повърхността на диска вместо от некоригируеми грешки, възникнали в резултат на шум (Cross-interleaved Reed-Solomon coding, 2024).

DVD дисковете използват подобна на CIRC схема, но с много по-големи блокове – например, (208, 192) вътрешен код и (182, 172) външен код.

Коригирането на грешки с код на Рийд-Соломон се използва и при архивни файлове, които при публикуването им се придружават от мултимедийни файлове в USENET (What

is Usenet?, 2024). Услугата за разпределено онлайн съхранение Wuala (спряна през 2015 г.) също използваше кодовете на Рийд-Соломон при разбиване на файлове (Фиг. 2) (Wuala, 2024).

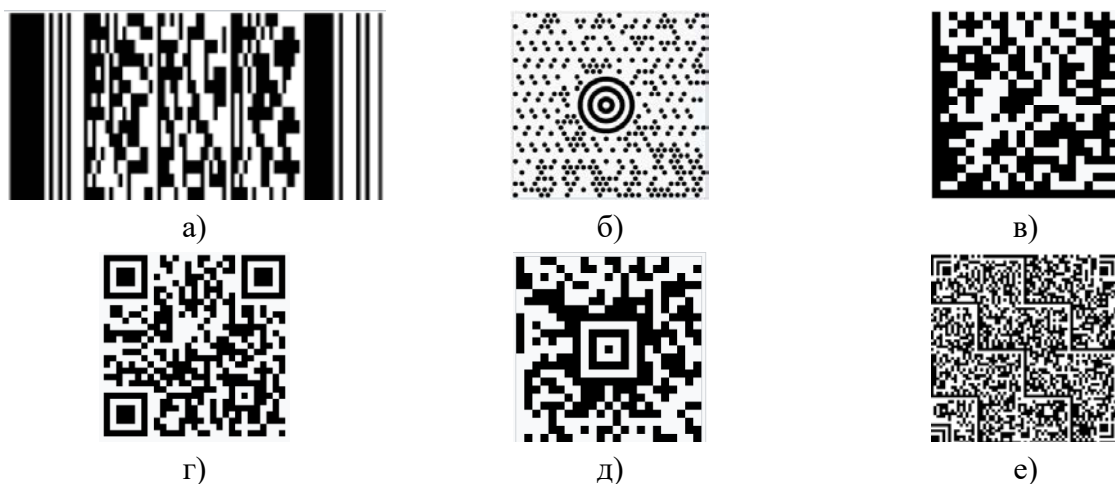


Фиг. 2. Съхранение на данни

И накрая, кодовете на Рийд-Соломон, както при всеки блоков код, използван в систематичен контекст, могат да бъдат „съкратени“ до определена степен. Повечето кодове за контрол на грешки имат определена дължина. Например кодовете на Рийд-Соломон, дефинирани върху полето на Галоа $GF(256)$, имат стандартна дължина 256 (или 255 при използване на генераторен полином). Системата на компактдиска може да използва кодове на Рийд-Соломон с дължина 32 и 28 символа, като същевременно запазва 8-битовата символна структура на кода с дължина 255. По-кратката дължина на кодовата дума позволява използването на техника за разпръскване на данните във времето или честотната лента, така че да се намали влиянието на импулсните смущения и други видове грешки при предаването.

Баркодове

Почти всички двумерни баркодове като PDF-417, MaxiCode, Datamatrix, QR Code, Aztec Code и Nan Xin code (Фиг. 3) използват корекция на грешките с код на Рийд-Соломон, за да позволят правилно четене, дори ако баркодът е повреден. Когато баркод скенерът не може да разпознае баркод символ, той го третира като изтрит (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009; Reed–Solomon error correction, 2024).



Фиг. 3. Двумерни баркодове, използващи код на Рийд-Соломон: а) PDF417; б) MaxiCode; в) Data Matrix; г) QR code; д) Aztec Code; е) Nan Xin code

PDF417 е „подреден“ линеен формат на баркод, използван в различни приложения като транспорт, идентификационни карти и управление на инвентара. „PDF“ означава преносим файл с данни. „417“ означава, че всеки шаблон в кода се състои от 4 ленти и

интервали в модел, който е дълъг 17 единици (модули). PDF417 е изобретен от д-р Ynjiun P. Wang в Symbol Technologies през 1991 г. Дефиниран е в ISO 15438 (PDF414, 2024).

MaxiCode е обществено достояние, машинно-четима символна система, първоначално създадена от United Parcel Service (UPS) през 1992 г. Подходящ за проследяване и управление на пратката на пакети, той прилича на Aztec Code или QR код, но използва точки, подредени в шестоъгълна мрежа вместо квадратна мрежа. MaxiCode е стандартизиран съгласно ISO/IEC 16023 (MaxiCode, 2024).

Data Matrix (матрицата на данни) е двуизмерен код, състоящ се от черни и бели „клетки“ или точки, подредени в квадрат или правоъгълник, известен също като матрица. Информацията, която трябва да бъде кодирана, може да бъде текстова или цифрова информация. Обичайният размер на данните е от няколко байта до 1556 байта. Дължината на кодираните данни зависи от броя на клетките в матрицата. Кодовете за коригиране на грешки често се използват за повишаване на надеждността: дори ако една или повече клетки са повредени, така че да не се четат, съобщението все още може да бъде прочетено. Символ на Data Matrix може да съхранява до 2335 буквено-цифрови знака (Data Matrix, 2024).

QR код (код за бърз отговор) е вид двумерен матричен баркод, изобретен през 1994 г. от японската компания Denso Wave за етикетиране на автомобилни части. Той включва черни квадрати на бял фон с референтни маркери, четими от устройства за изображения като камери и обработени с помощта на кодове с корекция на грешки на Рийд-Соломон, докато изображението може да бъде интерпретирано по подходящ начин. След това необходимите данни се извличат от модели, които присъстват както в хоризонталните, така и във вертикалните компоненти на QR изображението. Докато баркодът е машинно-четимо оптично изображение, което съдържа информация, специфична за етикетирания артикул, QR кодът съдържа данните за локатор, идентификатор и уеб проследяване. За да съхраняват данните ефективно, QR кодовете използват четири стандартизирани режима на кодиране: 1) цифрово; 2) буквено-цифрови; 3) байт или двоичен; 4) канджи (QR code, 2024).

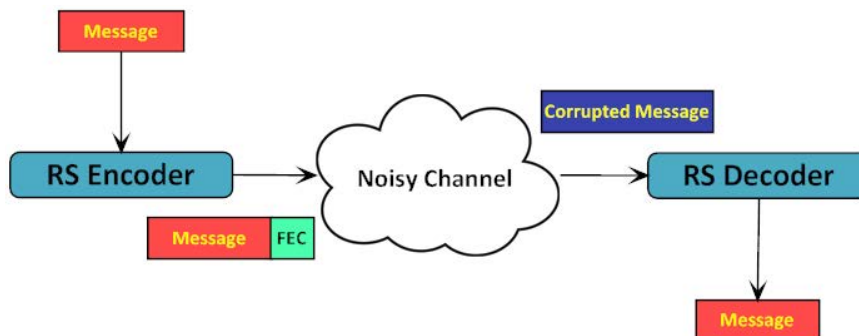
Aztec code (кодът на ацтеките) е матричен код, изобретен от Андрю Лонгакър младши и Робърт Хъси през 1995 г. Кодът е публикуван от AIM, Inc. през 1997 г. Въпреки, че е патентован, този патент е официално направен обществено достояние. Публикуван е и като стандарт ISO/IEC 24778:2024. Този код има потенциала да използва по-малко пространство от другите матрични баркодове, тъй като не изисква заобикаляща празна „тиха зона“ (Aztec Code, 2024).

Кодът Han Xin (汉信码 на китайски, чувствителен към китайски код) е двумерна (2D) матрична баркод символика, изобретена през 2007 г. от китайската компания The Article Numbering Center of China (中国物品编码中心 на китайски), за да наруши монопола на QR кода. Като QR код, кодът Han Xin се състои от черни квадрати и бели квадратни пространства, подредени в квадратна мрежа на бял фон. Той има четири шаблона за намиране и други маркери, които позволяват разпознаването му с четци, базирани на камера. Кодът на Han Xin съдържа корекция на грешки с код на Рийд-Соломон с възможност за четене на повредени изображения. Понастоящем той е издаден като ISO/IEC 20830:2021 стандарт (Han Xin code, 2024).

Предаване на данни

Различни специализирани форми на кодовете на Рийд-Соломон, по-специално Cauchy-RS и Vandermonde-RS, могат да се използват за преодоляване на ненадеждния характер на предаването на данни по канали с изтриване. Процесът на кодиране предполага използването на код $RS(N, K)$, което води до N кодови думи с дължина N символа, всеки от които съхранява K символа от данни, които се генерират, които след това се изпращат по канал с изтриване.

Всяка комбинация от K кодови думи, получена от другия край, е достатъчна, за да се възстановят всичките N кодови думи. Кодовата скорост обикновено е настроена на $1/2$, освен ако вероятността за изтриване на канала не се счита, че е по-малка. В заключение N обикновено е $2K$, което означава, че поне половината от всички изпратени кодови думи трябва да бъдат получени, за да се реконструират успешно всички изпратени кодови думи (Фиг. 4) (Reed–Solomon error correction, 2024).



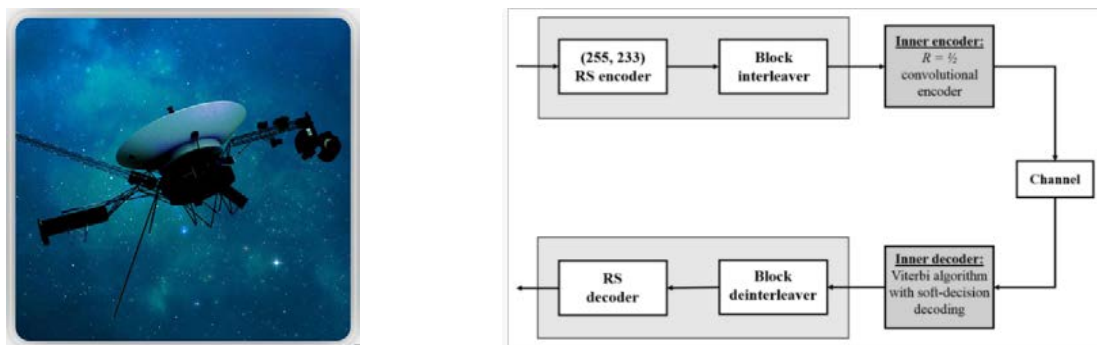
Фиг. 4. Комуникационна система с кодер и декодер на Рийд-Соломон при предаване на съобщения

Кодовете на Рийд-Соломон също се използват в xDSL системите и спецификациите на протокола за космически комуникации на CCSDS като форма за коригиране на грешки (Reed–Solomon error correction, 2024). Цифровата абонатна линия (Digital Subscriber Line, DSL) е семейство от технологии, които се използват за предаване на цифрови данни по телефонни линии. В телекомуникационния маркетинг терминът DSL се разбира като асиметрична цифрова абонатна линия (ADSL), най-често инсталираната DSL технология за достъп до Интернет (Digital subscriber line, 2024).

Спецификациите на протокола за космически комуникации (Space Communications Protocol Specifications, SCPS) са набор от разширения на съществуващи протоколи и нови протоколи, разработени от Консултативния комитет за системи за космически данни (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) за подобряване на производителността на интернет протоколите в космическа среда (Space Communications Protocol Specifications, 2024).

Телекомуникационни системи за дълбокия космос

McEliece и Swanson изследват използването на кодовете на Рийд-Соломон в няколко от мисиите на Националната администрация по въздухоплаване и изследване на космическото пространство (National Aeronautics and Space Administration, NASA) и Европейската космическа агенция (European Space Agency, ESA). Изследването им започва с отбелязването на факта, че кодовете на Рийд-Соломон не са очевидният избор за телекомуникационните системи за дълбокия космос, тъй като в канала в дълбокия космос не се получават пакетни грешки при предаването на данни. По-късно се установява, че използването на конволюционни кодове и кодове на Рийд-Соломон води до постигането на огромни печалби от кодирането. Конволюционният код се използва като т. нар. „вътрешен код“, докато кодът на Рийд-Соломон, т. нар. „външен код“, се използва за коригиране на грешки на изхода на конволюционния (Viterbi) декодер. Декодерите на Viterbi са склонни да генерират грешки в кратки поредици, за това и коригирането на тези пакетни грешки е работа, която се извършва най-добре с кратки или опростени кодове на Рийд-Соломон (Фиг. 5) (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).



Фиг. 5. Телекомуникационни системи за дълбокия космос

Най-известното приложение на свързаната система с конволюционен код и код на Рийд-Соломон е в експедициите на Voyager до Уран и Нептун. Voyager първа въвежда кодирането на Рийд-Соломон, свързано с конволюционни кодове – практика, която след въвеждането си стана много широко разпространена в космоса и сателитните комуникации. Кодовете на Рийд-Соломон бяха използвани при предаването на снимки от тези планети, предоставяйки изображения в близък план на светове, които за нас някога са били малки петна, станали видими само чрез използването на мощни телескопи.

Съвременни версии на системи със свързване на кодиране на Рийд-Соломон и конволюционно кодиране с декодиране по Viterbi се използват в мисиите на Mars Pathfinder, Galileo, Mars Exploration Rover и Cassini, където те работят в рамките на около 1–1,5 dB от крайната граница, капацитетът на Шанън (Таблица 1) (Reed–Solomon error correction, 2024).

Таблица 1. Схеми за шумоустойчиво кодиране, използвани в мисиите на NASA

Години	Код	Мисии
1958–до сега	Без кодиране	Explorer, Mariner, и много други
1968–1978	Конволюционен код (CC) (25, 1/2)	Pioneer, Venus
1969–1975	Код на Рийд-Мюлер (32, 6)	Mariner, Viking
1977–до сега	Двоичен код на Голей	Voyager
1977–до сега	RS(255, 223) + CC(7, 1/2)	Voyager, Galileo, и много други
1989–2003	RS(255, 223) + CC(7, 1/3)	Voyager
1989–2003	RS(255, 223) + CC(14, 1/4)	Galileo
1996–до сега	RS + CC (15, 1/6)	Cassini, Mars Pathfinder, и други
2004–до сега	Турбо-кодове	Messenger, Stereo, MRO, и други
2009	LDPC кодове	Constellation, MSL

По време на мисията на Galileo до Юпитер, антената с високо усилване на борда на космическия кораб отказва да се „разгърне“ правилно и следователно е безполезна. Всички данни, събрани от сондата, трябва да бъдат изпратени до земята чрез антена с малко усилване, което води до драстично понижаване на скоростта, с която космическият кораб може надеждно да предава данните. Инженерите по целия свят работят трескаво, за да намерят начини да увеличат печалбата от кодиране, осигурено от свързаните кодове, използвани от Galileo. Hagenauer, Offer, и Papke (Hagenauer, J., Offer, E., & Papke, L., 1993), част от немската аерокосмическа изследователска институция, обсъждат различни мощни средства за справяне с този проблем. Сред тях е решението да включат използването на итеративно декодиране и алгоритъм на Viterbi с мек изход (SOVA), като по този начин

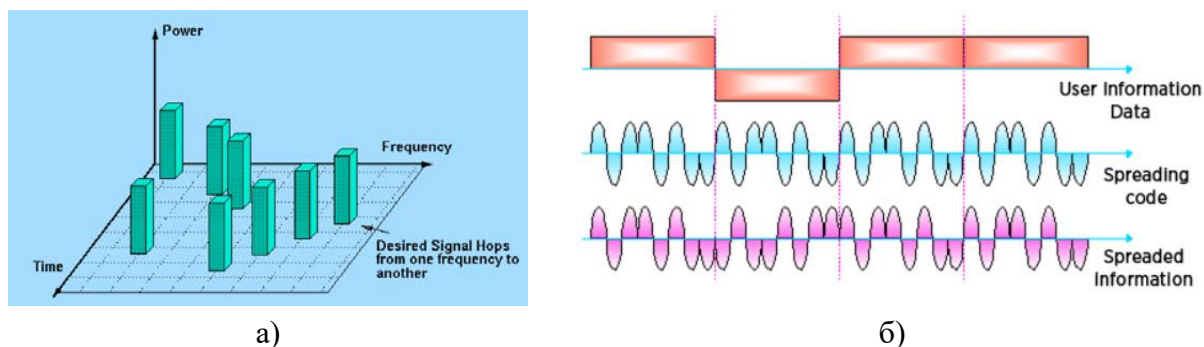
подобряят значително производителността на системата. Един ключов резултат, произтичащ от тази работа, е демонстрацията, че системата със свързване на конволюционен код и код на Рийд-Соломон може да осигури надеждно предаване на данни извън граничната скорост. Граничната скорост е информационно-теоретична концепция, която мнозина смятат, че обозначава най-добрата възможна производителност за система за контрол на грешки. Резултатите показват, че за конкатенирана система за контрол на грешки тази предполагаема бариера може да бъде преодоляна. Hagenauer, Offer и Papke доведоха производителността на система за контрол на грешките с код на Reed-Solomon в рамките на няколко децибела от крайната бариера: капацитета на канала (Hagenauer, J., Offer, E., & Papke, L., 1993; Wicker, S., & Bhargava, V., 1999).

Контрол на грешки за системи с обратна връзка

Stephen B. Wicker, професор по електротехника и компютърно инженерство в университета Корнуел, и Michael Bartz, професор в института за международна търговия и устойчива икономика, разглеждат различни средства за използване на кодовете на Рийд-Соломон в приложения, които позволяват предаването на информация от приемника обратно към предавателя. Такива приложения включват мобилни системи за предаване на данни и високонадеждни военни комуникационни системи. Наред с техните възможности за коригиране на грешки, кодовете на Рийд-Соломон могат да осигурят значително количество *едновременно* откриване на грешки. Ключът се крие в разграничението между *грешка на декодера* и *повреда на декодера*. Нека код на Рийд-Соломон може да коригира t грешки. Ако получената дума се различава от неправилна кодова дума в t или по-малко координати (битове), тогава тази кодова дума ще бъде избрана от декодера, което ще доведе до грешка в декодера. Това е неоткриваемо състояние, което причинява грешки в декодираните данни. От друга страна, ако една повредена от шум дума се различава от *всички* кодови думи в $(t + 1)$ или повече координати, тогава декодерът обявява *повреда на декодера*. Тези повреди са откриваеми и приемникът може да поиска повторно предаване на проблемната дума. Такива грешки на декодера са доста редки и заявките за повторно предаване могат да се използват за разработване на системи за контрол на грешки с код на Рийд-Соломон с изключително високи нива на надеждност. Обсъждат се две такива системи. Първата е просто разширение на стандартната система за контрол на грешките на Рийд-Соломон с коригиране на грешки. Втората система използва специалните свойства на кодовете на Рийд-Соломон, за да създаде система за комбиниране на кодове. Така множество получени думи се комбинират, за да се създадат кодови думи от все по-мощни кодове. Без значение колко зашумен може да е каналът, тази система гарантира, че на потребителя ще бъдат предоставени сигурни и надеждни данни.

Системи с разширен спектър

Системите с разширен спектър могат да бъдат групирани в два основни типа: разширен спектър със скокове на честотата (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FH/SS) и разширен спектър с директна последователност (Direct-Sequence Spread Spectrum, DS/SS). FH/SS системата модулира информацията върху носеща, която систематично се премества от една честота на друга (Frequency Hopping, 2024). Прескачането между различни честоти се използва във военните комуникационни системи като мощно средство за преодоляване на заглушаването на честотната лента. Тази система осигурява защита срещу всякакви смущения. В спокойна среда такива смущения могат да възникнат от смущения при многократен достъп или от теснолентови източници на шум. Те могат да бъдат причинени от честотно-селективно затихване на мобилен комуникационен канал (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).



Фиг. 6. Системи с разширен спектър: а) разширен спектър със скокове на честотата (FH/SS); б) разширен спектър с директна последователност (DS/SS)

DS/SS системата създава широколентов сигнал чрез фазова манипулация (изместване на фазата) на радиочестотната носеща със сумата от последователността от данни и „разпръскващата“ последователност, чиято честота на импулсите е много по-голяма от тази на последователността от данни. Когато полученият сигнал е „разширен“, теснолентовите смущаващи сигнали се разпръскват така, че само малка част от тяхната мощност да попадне в честотната лента на възстановената последователност от данни. Както FH/SS системите, така и DS/SS системите се представят добре срещу смущения в малка честотна лента. DS/SS системите имат допълнителното предимство на спектъра с ниска вероятност за прихващане (low-probability-of-intercept (LPI) spectrum). Тъй като енергията на предавания сигнал се разпространява в широк спектър, само малко количество енергия на сигнала се намира във всеки даден теснолентов слот, в който врагът може да търси дейност. DS/SS системите се използват в мобилните радиокомуникации (What is Direct Sequence Spread Spectrum?, 2024).

Dilip V. Sarwate, почетен професор в катедрата по електротехника и компютърно инженерство в университета на Илинойс в Урбана-Шампейн, описва дизайна и работата на няколко FH/SS системи. След това разглежда как кодовете на Рийд-Соломон могат да бъдат използвани при проектирането на „подскачащите последователности“. Ако тези последователности са внимателно подбрани, смущенията, причинени от други потребители в средата с множествен достъп, могат да бъдат значително намалени. Dilip V. Sarwate показва, че някои от подскачащите последователности, които са описани с друга терминология, могат също да се разглеждат като кодови думи на Рийд-Соломон с ниска скорост. По-късно той описва няколко DS/SS системи и показва, че познатите последователности на Gold и Kasami също могат да бъдат интерпретирани с помощта на езика на кодовете на Рийд-Соломон (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).

М. В. Pursley изследва по-подробно приложението на кодове на Рийд-Соломон за коригиране на грешки в FH/SS системи. Той се фокусира върху различни средства, чрез които може да се получи странична информация от система с честотни скокове и да се използва за деклариране на изтривания на входа на декодера на Рийд-Соломон. Той започва с разглеждане на използването на тестови символи и прагови тестове, които изискват много малка модификация на съществуващата FH/SS система, но осигуряват значително подобрене в производителността. По-късно разглежда по-мощни техники, включително използването на двоични проверки за паритет (четност) на отделни символи на кодова дума и извличане на странична информация от вътрешния декодер в свързаната система. М. В. Pursley изследва и използването на странична информация в алгоритмите за маршрутизиране в радиомрежите с пакетна комуникация (Wicker, S., & Bhargava, V., 1999).

Компютърна памет

Saitoh и Imai описват проблемите с контрола на грешките, причинени от грешки в интегралните схеми, използвани за контрол на потока от данни в компютрите. Получените модели на грешки в тези системи обикновено са еднопосочни; с други думи, грешните

битове имат една и съща стойност. Saitoh и Imai показват, че тази еднопосочна тенденция може да се използва за разработване на кодове, базирани на кодове на Рийд-Соломон, които превъзхождат стандартните кодове на Рийд-Соломон. Такива усъвършенствани системи за контрол на грешки играят неразделна роля в разработването на изключително високоскоростни супер компютри (Wicker, S., & Bhargava, V., 2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

CD плеърът е първото от многото комерсиални и масови приложения, на които кодовете на Рийд-Соломон се радват през последните години. Търговският свят става все по-мобилен, като същевременно изисква надежден и бърз достъп до информация за продажбите, маркетинга и счетоводството. Тъй като мобилният канал е неприятна среда за комуникация, кодовете на Рийд-Соломон са най-доброто решение на проблемите, които се получават в него – няма друга система за контрол на грешки, която да може да води до такава голяма надеждност в мобилната среда.

Оптичният канал създава друг набор от проблеми. Шумът и шумната среда засягат оптичните системи за пряка видимост, създавайки шум, който може да се управлява най-добре от кодовете на Рийд-Соломон. Тъй като оптичните влакна намират приложение все по-често на все повече и повече места, може да се очаква да се видят кодовете на Рийд-Соломон, използвани и при тях.

В по-специализирани приложения, за еднократна употреба, като случайни сонди за дълбокия космос, кодовете на Рийд-Соломон ще продължат да се използват, за да подпомагат работата на комуникационната система да бъде все по-близо до границата на Шенън. Това са само малка част от приложенията, които показват, че кодовете на Ървинг Рийд и Гюс Соломон ще бъдат част от телекомуникациите още много дълго време.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази публикация е изготвена с подкрепата на Проект 2024-ФЕЕА-03 „Създаване и изследване на комбинирана методика за дигитализация на обекти посредством лазерни 3D скенери, скенери със структурирана светлина и фотограметрия“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“.

REFERENCES

- Aztec Code, https://en.wikipedia.org/wiki/Aztec_Code (Accessed on 23.11.2024).
- Cross-interleaved Reed–Solomon coding, https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-interleaved_Reed%E2%80%93Solomon_coding (Accessed on 23.11.2024).
- Data Matrix, https://en.wikipedia.org/wiki/Data_Matrix (Accessed on 23.11.2024).
- Digital subscriber line, https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_subscriber_line (Accessed on 23.11.2024).
- Frequency Hopping, <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/spreadsp/fh.htm> (Accessed on 23.11.2024).
- Hagenauer, J., Offer, E., & Papke, L. (1993). *Improving the Standard Coding System for Deep Space Missions*, Proceedings of ICC'93 – IEEE International Conference on Communications, Geneva, Switzerland, vol. 2, pp. 1092-1097, doi: 10.1109/ICC.1993.397446, <https://ieeexplore.ieee.org/document/397446?signout=success> (Accessed on 23.11.2024).
- Han Xin code, https://en.wikipedia.org/wiki/Han_Xin_code (Accessed on 23.11.2024).
- MaxiCode, <https://en.wikipedia.org/wiki/MaxiCode> (Accessed on 23.11.2024).
- PDF417, <https://en.wikipedia.org/wiki/PDF417> (Accessed on 23.11.2024).

QR code, https://en.wikipedia.org/wiki/QR_code (Accessed on 23.11.2024).

Reed, I. S., & Solomon, G. (1960). *Polynomial Codes over Certain Finite Fields*, SIAM Journal of Applied Mathematics, vol. 8, pp. 300-304.

Reed–Solomon error correction, https://en.wikipedia.org/wiki/Reed–Solomon_error_correction (Accessed on 23.11.2024).

Space Communications Protocol Specifications, https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Communications_Protocol_Specifications (Accessed on 23.11.2024).

What is Direct Sequence Spread Spectrum? <https://www.everythingrf.com/community/what-is-direct-sequence-spread-spectrum> (Accessed on 23.11.2024).

What is Usenet? <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-usenet/> (Accessed on 23.11.2024).

Wicker, S., & Bhargava, V. (2009). *An Introduction to Reed-Solomon Codes*. DOI: 10.1109/9780470546345.ch1, <https://catalogimages.wiley.com/images/db/pdf/0780353919.excerpt.pdf> (Accessed on 23.11.2024).

Wicker, S., & Bhargava, V. (1999). *Reed-Solomon Codes and Their Applications*. Wiley-IEEE Press, 336 pages, ISBN: 978-0-780-35391-6, <https://www.wiley.com/en-ca/Reed+Solomon+Codes+and+Their+Applications-p-9780780353916> (Accessed on 23.11.2024).

Wuala, <https://en.wikipedia.org/wiki/Wuala> (Accessed on 23.11.2024).